

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA**

**FACULTE DE SCIENCES ET TECHNOLOGIES  
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE  
N° : ER-06**



**DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIE  
FILIERE : Génie civil  
OPTION : Matériaux**

**Mémoire présenté pour l'obtention  
Du diplôme de Master Académique**

**Par:**

**SAOUDI Ismail  
ABI Abderraouf**

**Intitulé**

**Effet de la température de mûrissement sur les  
caractéristiques mécaniques du béton avec poudre de  
brique recyclée**

**Soutenu devant le jury composé de :**

<b>NACERI ABDERLGHANI</b>	<b>Université Mohamed Boudiaf - M'sila</b>	<b>Président</b>
<b>BOUALLEG SAIDA</b>	<b>Université Mohamed Boudiaf - M'sila</b>	<b>Examineur</b>
<b>AMRIOU ABDERRACHID</b>	<b>Université Mohamed Boudiaf - M'sila</b>	<b>Rapporteur</b>

**Année universitaire : 2024/ 2025**

## *R*emerciements

*Je remercie avant tout الله Tout-Puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'Il nous a accordées tout au long de ces années d'études, et qui nous ont permis d'atteindre cet objectif.*

*الحمد والشكر لله*

*Je tiens ensuite à exprimer ma profonde gratitude à notre encadrant Abderrachid AMRIOU pour son accompagnement, sa confiance et sa disponibilité constante. Son encadrement rigoureux et ses conseils avisés ont été d'un apport inestimable à la réalisation de ce travail. Qu'il trouve dans ce mémoire un témoignage sincère de ma reconnaissance.*

*Nous adressons également nos remerciements les plus sincères à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à l'élaboration et à la finalisation de ce mémoire.*

*Nos remerciements vont également à l'ensemble du corps enseignant, au **chef du département** ainsi qu'aux membres du laboratoire, pour leur encadrement pédagogique et leur soutien tout au long de notre parcours académique. Nous remercions aussi les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer notre travail.*

*Enfin, nous exprimons notre reconnaissance à nos amis et camarades, pour leur soutien moral et matériel tout au long de cette aventure. **Merci.***

# *Dédicaces de Abderraouf*

À ceux qui ont semé en moi les valeurs et m'ont appris que  
le chemin de la réussite passe par la patience et le travail,

À mes chers parents, que les mots ne sauraient remercier à  
leur juste valeur.

À mes frères, qui ont toujours été mon appui dans toutes les  
étapes de ma vie,

Et à mes amis fidèles qui ont partagé avec moi ce parcours  
avec ses hauts et ses bas,

Je dédie ce travail en témoignage d'amour, de gratitude et  
de profonde reconnaissance.

*Abderraouf*

# *Dédicaces de Osmail*

Je dédie ce travail modeste

À mes parents, pour leurs sacrifices et leurs prières  
silencieuses qui ont illuminé mon chemin,

À mes frères, pour leur soutien inlassable et leurs  
encouragements,

Et à mes amis, présents à chaque étape de ce  
parcours,

Recevez tous cette modeste réalisation en témoignage  
de mon estime et de ma reconnaissance.

A Tous les enseignants qui m'ont aidé de proche ou  
de loin pour être un jour un Master en génie civil

A tous les étudiants de génie civil de l'Université de  
M'sila et surtout les Étudiants de la deuxième Année  
Master « Matériaux »

Promo 2024 /2025.

Je vous remercie tous.....

*Osmail*

# Résumé

Le béton est le matériau le plus utilisé dans le domaine de la construction. Les conditions de durcissement, principalement la cure du béton, constituent une étape cruciale pour ses propriétés mécaniques. La température de cure influence l'hydratation du ciment, et par conséquent les propriétés finales du béton, notamment sa résistance et sa durabilité.

Le recyclage et la valorisation des déchets de construction, tels que les déchets de briques, sont aujourd'hui considérés comme une solution d'avenir pour répondre au déséquilibre entre la production et la consommation des granulats, tout en contribuant à la protection de l'environnement. C'est dans ce cadre que s'inscrit ce travail, portant sur la valorisation des déchets de briques dans la fabrication du béton.

L'objectif général de ce travail est d'évaluer expérimentalement les performances mécaniques et la durabilité des bétons fabriqués en utilisant de la poudre de brique recyclée concassée comme addition au ciment, à des taux de 8 % et 15 % en poids. Les échantillons sont soumis à plusieurs modes de cure afin d'évaluer l'effet de la température de durcissement sur les caractéristiques du béton après 28 jours de conservation.

Les résultats obtenus à travers cette étude expérimentale permettent de conclure dans quelle mesure l'utilisation de la poudre de brique recyclée concassée peut améliorer les caractéristiques physico-mécaniques du béton selon les différents modes et durées de cure.

**Mots clés :**

## ملخص

يُعتبر الخرسانة أكثر المواد استخدامًا في مجال البناء. تُعدّ ظروف المعالجة، وخاصةً المعالجة الحرارية أو "المعالجة بالماء"، مرحلة حاسمة تؤثر على الخصائص الميكانيكية للخرسانة. حيث تؤثر درجة حرارة المعالجة على عملية إمالة الأسمنت، وبالتالي على مقاومة الخرسانة ومتانتها النهائية.

أصبح تدوير واستغلال نفايات البناء، مثل نفايات الطوب، من الحلول الواعدة لتقليل الفجوة بين إنتاج وطلب الركام، إلى جانب دوره في حماية البيئة. وفي هذا السياق، جاء هذا البحث لدراسة إمكانية استخدام مسحوق الطوب المعاد تدويره في تصنيع الخرسانة.

يهدف هذا العمل إلى تقييم الأداء الميكانيكي ومتانة الخرسانة المُحضّرة باستخدام مسحوق الطوب المعاد تدويره، كنسبة مضافة إلى الأسمنت بنسب 8% و15%. وقد تم إخضاع العينات لعدة طرق معالجة حرارية لتقييم تأثير درجة حرارة المعالجة على خصائص الخرسانة بعد 28 يومًا من التحضير.

وقد أظهرت النتائج التجريبية إمكانية تحسين الخصائص الفيزيوميكانيكية للخرسانة عند استخدام مسحوق الطوب المعاد تدويره، بحسب نمط ومدة المعالجة.

**لكلمات المفتاحية:**

## **Abstract**

Concrete is the most widely used material in the construction sector. Curing conditions, particularly thermal or water curing, are a crucial step for ensuring the mechanical properties of concrete. The curing temperature significantly affects cement hydration, and consequently influences the final properties of concrete, such as strength and durability.

Recycling and reusing construction waste, such as brick debris, are now seen as promising solutions to reduce the gap between aggregate production and demand, while also protecting the environment. This study fits into this context by investigating the valorization of brick waste in concrete manufacturing.

The main objective of this work is to experimentally evaluate the mechanical performance and durability of concrete made with crushed recycled brick powder, used as a cement replacement at proportions of 8% and 15% by weight. The test specimens were subjected to various curing methods to assess the influence of curing temperature on concrete properties after 28 days.

The results of this experimental study indicate to what extent the use of crushed recycled brick powder can enhance the physico-mechanical properties of concrete under different curing modes and durations.

**Keywords:**



## ***Table des matières***

Résumé .....	-
Introduction Générale.....	- 1 -
1. Généralités sur la fabrication et les constituants de ciment.....	- 4 -
Introduction .....	- 4 -
1.1. Constituants et hydratation de ciment : .....	- 4 -
Définition de ciment : .....	- 4 -
Etapas de fabrication de ciments : .....	- 5 -
1.1.1.1. Extraction des matières premières : .....	- 6 -
1.1.1.2. Cuisson : .....	- 6 -
1.1.1.3. Refroidissement : .....	- 8 -
1.1.1.4. Broyage : .....	- 9 -
1.1.1.5. Les ajouts : .....	- 9 -
Constituent du ciment : .....	- 9 -
Types du ciment : .....	- 10 -
L'hydratation du ciment : .....	- 10 -
Différents types de pâte de ciment hydratée : .....	- 12 -
Le rôle du gypse dans le ciment : .....	- 13 -
1.2. La structure poreuse du béton : .....	- 13 -
Description de la structure poreuse du béton : .....	- 14 -
Distribution et taille des pores dans le béton : .....	- 15 -
1.2.1.1. Pores relatifs aux capillaires : .....	- 16 -
1.2.1.2. Pores relatifs aux hydrates : .....	- 16 -
1.2.1.3. Autres types de pores : .....	- 16 -
Interface des pores sur les caractéristiques : .....	- 17 -
Effet de la formulation sur les caractéristiques du béton : .....	- 17 -
Conclusion.....	- 19 -
2. Effet des conditions de mûrissement et de cure sur les caractéristiques du béton.....	- 21 -
Introduction .....	- 21 -
2.1. Différentes formes d'eau dans la pâte de ciment hydrate : .....	- 21 -
2.2. Influence du rapport E/C sur la résistance de la pâte de ciment : .....	- 23 -
2.3. Méthodes de caractérisation de la porosité du béton : .....	- 26 -
b) Porosité accessible à l'eau (Norme NF P 18-459):.....	- 26 -
c) Analyse d'image (Microscopie optique ou électronique):.....	- 27 -
2.4. Facteurs influençant la résistance à la compression du béton .....	- 28 -
a. Porosité : .....	- 28 -
b. Rapport E/C : .....	- 28 -
c. Rapport Gel / vide du ciment hydrate : .....	- 28 -
2.5. Influence du mûrissement sur les caractéristiques du béton : .....	- 28 -

2.6.	Influence de la température sur le béton :.....	- 31 -
2.7.	Problèmes du béton pendant un climat chaud :.....	- 32 -
	Ouvrabilité :.....	- 32 -
	Temps de prise :.....	- 34 -
	Retrait plastique :.....	- 35 -
2.8.	La cure du béton :.....	- 36 -
	Méthode de cure (mûrissement) :.....	- 36 -
	2.8.1.1. Vaporisation de produits de cure formant membrane : .....	- 36 -
	2.8.1.2. L'arrosage et la vaporisation d'eau : .....	- 37 -
	2.8.1.3. L'application des toiles imbibées d'eau : .....	- 37 -
	2.8.1.4. Nappe d'eau et l'immersion : .....	- 37 -
	2.8.1.5. Pellicules de plastique ou de papiers imperméables :.....	- 37 -
	Importance et conséquences de la cure : .....	- 38 -
	Influence de la cure sur la résistance : .....	- 39 -
2.9.	Influence des additions sur les caractéristiques du béton :.....	- 42 -
	Définition : .....	- 42 -
	Fumée de silice :.....	- 42 -
	Incorporation de fumée de silice : .....	- 42 -
	Obtention d'un BHP à base de la fumée de silice :.....	- 43 -
2.10.	Influence des adjuvants sur les caractéristiques du béton: .....	- 43 -
2.11.	Influence de la cure sur la durabilité des bétons :.....	- 47 -
2.12.	Moyens de caractérisation des caractéristiques du béton .....	- 47 -
	Résistance à la compression : .....	- 47 -
2.13.	Porosité accessible à l'eau :.....	- 47 -
	Absorption d'eau dans le béton :.....	- 48 -
	Essais de séchage / mouillage : .....	- 49 -
	Essais ultrasoniques :.....	- 49 -
	Conclusion.....	- 50 -
3.	Recyclage, préparation des déchets et utilisation dans le béton .....	- 52 -
	Introduction .....	- 52 -
3.1.	Généralités sur les déchets : .....	- 52 -
	Définition des déchets : .....	- 52 -
	3.1.1.1. D'un point de vue économique : .....	- 52 -
	3.1.1.2. Du point de vue juridique :.....	- 53 -
	Différents types de déchets :.....	- 53 -
	Origine de la production des déchets :.....	- 55 -
3.2.	Recyclage des déchets :.....	- 56 -
	Définition : .....	- 56 -
	But du recyclage des déchets :.....	- 56 -

Techniques de recyclage des déchets : .....	- 57 -
3.2.1.1. Procédés du recyclage : .....	- 57 -
3.2.1.2. Étapes du recyclage : .....	- 57 -
Gestion des déchets : .....	- 58 -
3.2.1.3. Définition : .....	- 58 -
3.2.1.4. Principes de gestion des déchets : .....	- 58 -
3.2.1.5. Méthodes de gestion des déchets : .....	- 59 -
3.3. Différents types de déchets : .....	- 63 -
Déchets ultimes : .....	- 63 -
Déchets inertes : .....	- 63 -
Déchets d'emballages : .....	- 64 -
Déchets ménagers : .....	- 64 -
Déchets organiques : .....	- 64 -
Déchets d'activités de soins : .....	- 64 -
Déchets médicaux : .....	- 64 -
Déchets agricoles : .....	- 65 -
Déchets industriels : .....	- 65 -
3.4. Utilisation des déchets de brique dans le béton : .....	- 65 -
Définition des déchets de brique : .....	- 65 -
Propriétés des déchets de brique : .....	- 65 -
Caractéristiques du béton contenant le déchet de brique : .....	- 66 -
Conclusion.....	- 67 -
4. Etude Expérimentale .....	- 69 -
Introduction .....	- 69 -
4.1. Caractérisation des matériaux utilisés : .....	- 69 -
Le ciment : Ciment portland NA442CEMII/B-L42,5N .....	- 70 -
4.2. Essais sur les granulats .....	- 71 -
Analyse Granulométrique : .....	- 71 -
B. Mode opératoire de l'analyse granulométrique : .....	- 72 -
C. Les résultats des analyses granulométriques : .....	- 73 -
Masse volumique apparente du gravier : .....	- 75 -
Masses volumiques absolues : .....	- 76 -
Sable concassé (0/5) : .....	- 77 -
3) <b>Indice des vides</b> : .....	- 82 -
4.3. Les Adjuvants dans le Béton : .....	- 82 -
Informations sur le produit Sika® Plastiment® BV-40 : .....	- 82 -
Caractéristiques / avantages : .....	- 83 -
Agréments / Normes : .....	- 83 -

4.4.	L'eau de gâchage :.....	- 84 -
4.5.	La formulation des bétons :.....	- 84 -
	L'objectif de la formulation du béton :.....	- 84 -
	Quelques méthodes de composition des bétons : .....	- 85 -
	IV. 6.3. Méthode de formulation de Dreux-Gorisse (réécriture améliorée) : .....	- 85 -
	Détermination du dosage en ciment : .....	- 86 -
	Détermination du dosage en eau :.....	- 87 -
	Détermination du dosage en granulats : .....	- 87 -
	<b>b. Dosage en eau :</b> .....	- 90 -
4.6.	Déchet de brique :.....	- 94 -
4.7.	Matériels et essais :.....	- 94 -
	L'exécution du malaxage : .....	- 94 -
	Malaxage du béton : .....	- 95 -
	Malaxeurs à béton : .....	- 95 -
	Mesure de la consistance (selon la norme NFP 18-415) : .....	- 95 -
	Vibration : [NAEN 12390-2] : .....	- 96 -
	Conduite des essais de température et humidité :.....	- 97 -
	Essai de compression :.....	- 97 -
	Porosité accessible à l'eau : .....	- 98 -
	Essai d'auscultation sonique (essai ultrasonique) : .....	- 99 -
4.8.	Essai mouillage – séchage (ASTM D559 – 57) : .....	- 100 -
4.9.	Représentation et interprétation des résultats : .....	- 100 -
	Conclusion Générale .....	- 111 -
	Références .....	- 112 -
	ANNEXES .....	- 116 -
	ANNEXE 1.....	- 117 -
	ANNEXE 2.....	- 121 -

## Table des figures

<b>Figure 1-1</b> : Le ciment .....	- 5 -
<b>Figure 1-2</b> : Etapes de fabrication de ciments.....	- 5 -
<b>Figure 1-3</b> : Extraction des matières premières .....	- 6 -
<b>Figure 1-4</b> : Zone de cuisson. ....	- 7 -
<b>Figure 1-5</b> : Clinker à la sortie de four et après le refroidissement. ....	- 7 -
<b>Figure 1-6</b> : Broyage la matière première.....	- 9 -
<b>Figure 1-7</b> : Modèle simplifié d'une pâte de ciment hydraté .....	- 12 -
<b>Figure 1-8</b> : Les Silicates De Calcium Hydraté C-S-H .....	- 13 -
<b>Figure 1-9</b> : La structure poreuse du béton.....	- 14 -
<b>Figure 1-10</b> : Schéma des pores dans un matériau .....	- 14 -
<b>Figure 1-11</b> : Illustration des différentes formes de porosité dans la pâte de ciment durcie	- 17 -
-	
<b>Figure 2-1</b> : Résistance en fonction du rapport E/C .....	- 24 -
<b>Figure 2-2</b> : Valeurs des résistances en fonction du rapport E/C.....	- 24 -
<b>Figure 2-3</b> : Relation entre la résistance calculée d'une pâte pure de ciment et le rapport E/C [23]. .....	- 25 -
<b>Figure 2-4</b> : Influence du rapport E/C sur la résistance à la compression du béton [25]....	- 25 -
<b>Figure 2-5</b> : Distribution des pores dans les bétons chauffés obtenus par prosimètre au mercure. A gauche BO – à droite BHP. ....	- 26 -
<b>Figure 2-6</b> : Porosité totale à l'eau en fonction de la température de conditionnement. ....	- 27 -
<b>Figure 2-7</b> : Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge du béton a différentes températures. ....	- 29 -
<b>Figure 2-8</b> : Evolution des résistances de bétons conservés à des températures différentes	- 30 -
-	
<b>Figure 2-9</b> : Influence des conditions de cure sur la résistance. ....	- 31 -
<b>Figure 2-10</b> : Evolution des résistances de bétons conservés à des températures différentes. ...	- 32 -
<b>Figure 2-11</b> : Effet de la température du béton sur l'affaissement et sur la quantité d'eau nécessaire lorsque l'affaissement varie de 25 mm [34].....	- 33 -
<b>Figure 2-12</b> : Effet de la température du béton sur la quantité d'eau requise pour maintenir un affaissement de 75 mm [34]. ....	- 34 -
<b>Figure 2-13</b> : Influence de la température sur le début et la fin de prise d'un CPA (CEM I 32.5) [36]. .....	- 35 -
<b>Figure 2-14</b> : Effet de la température sur le temps de début de prise [37].....	- 35 -
<b>Figure 2-15</b> : Effet de la température sur le temps de fin de prise [37]. ....	- 35 -
<b>Figure 2-16</b> : Toile imbibée [38]. ....	- 37 -
<b>Figure 2-17</b> : Papiers imperméables [38] .....	- 38 -
<b>Figure 2-18</b> : Fissuration due au départ d'eau [39]. .....	- 39 -
<b>Figure 2-19</b> : Effet de la température de mûrissement sur la résistance à la compression du béton (%) [41]. ....	- 40 -
<b>Figure 2-20</b> : Développement de la résistance à la compression d'un béton avec ciment portland sous différents modes de cure .....	- 41 -
<b>Figure 2-21</b> : Développement de la résistance à la compression du BHP avec la fumée de silice sous différents modes de cure Mak et Torii [1995] .....	- 41 -
<b>Figure 2-22</b> : Mode d'action d'une molécule de superplastifiant .....	- 45 -
<b>Figure 2-23</b> : Dispositif de rupture en compression .....	- 47 -

<b>Figure 2-24:</b> Essais de porosité accessible à l'eau.....	- 48 -
<b>Figure 2-25:</b> Absorption d'eau .....	- 49 -
<b>Figure 2-26 :</b> Essais ultrasoniques.....	- 50 -
<b>Figure 3-1 :</b> Déchets inertes.....	- 54 -
<b>Figure 3-2:</b> Compositions des déchets du bâtiment.....	- 54 -
<b>Figure 3-3:</b> Enfouissement des déchets .....	- 60 -
<b>Figure 3-4:</b> Incinération en plein air et usine d'incinération .....	- 60 -
<b>Figure 3-5:</b> Photo d'une décharge contrôlée .....	- 61 -
<b>Figure 3-6:</b> Compostage de déchets organiques.....	- 62 -
<b>Figure 3-7:</b> Usine de recyclage des déchets .....	- 62 -
<b>Figure 4-1:</b> Le Ciment portland.....	- 70 -
<b>Figure 4-2:</b> Analyse granulométrique.....	- 72 -
<b>Figure 4-3:</b> Analyse granulométrique des différents granulats .....	- 74 -
<b>Figure 4-4:</b> Essai d'équivalent de sable.....	- 78 -
<b>Figure 4-5:</b> Essais d'équivalent dessable. ....	- 79 -
<b>Figure 4-6:</b> Mécanisme d'action des plastifiants et super plastifiants .....	- 82 -
<b>Figure 4-7:</b> Sika® Plastiment® BV-40 .....	- 83 -
<b>Figure 4-8:</b> Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E. ....	- 86 -
<b>Figure 4-9:</b> Les lignes de partage .....	- 92 -
<b>Figure 4-10 :</b> déchets de briques.....	- 94 -
<b>Figure 4-11:</b> Le malaxeur utilisé (malaxeur de laboratoire Géo-matériaux). ....	- 95 -
<b>Figure 4-12 :</b> L'affaissement de cône d'Abrams d'un béton. ....	- 96 -
<b>Figure 4-13:</b> la table vibrante .....	- 97 -
<b>Figure 4-14 :</b> Appareil de température et d'humidité .....	- 97 -
<b>Figure 4-15:</b> Machine d'essai de compression.....	- 98 -
<b>Figure 4-16:</b> Pesée hydrostatique et l'appareille pour chauffer(ébullition)du béton.....	- 99 -
<b>Figure 4-17:</b> l'appareille d'essai ultrasonique .....	- 99 -
<b>Figure 4-18:</b> Résistance à la compression ( 0% de poudre de brique) .....	- 101 -
<b>Figure 4-19:</b> Résistance à la compression ( 8% de poudre de brique ) .....	- 101 -
<b>Figure 4-20:</b> Résistance à la compression ( 15% de poudre de brique ) .....	- 102 -
<b>Figure 4-21:</b> Porosité accessible à l'eau ( 0% de poudre de brique ) .....	- 104 -
<b>Figure 4-22:</b> Porosité accessible à l'eau ( 8% de poudre de brique ) .....	- 104 -
<b>Figure 4-23:</b> Porosité accessible à l'eau ( 15% de poudre de brique ) .....	- 105 -
<b>Figure 4-24:</b> Résistance à la compression poudre de brique 0%(Après séchage/ mouillage) ...	- 107 -
<b>Figure 4-25:</b> Résistance à la compression poudre de brique 8 % (Après séchage/ mouillage) .-	- 107 -
<b>Figure 4-26:</b> Résistance à la compression poudre de brique 15 % (Après séchage/ mouillage)-	- 108 -

## ***Liste des tableaux***

<b>Tableau 1-1</b> : Composition chimique de clinker .....	- 8 -
<b>Tableau 1-2</b> : les types des différents ciments.....	- 10 -
<b>Tableau 4-1</b> : l'analyse granulométrique du gravier (3/8) concassé : .....	- 73 -
<b>Tableau 4-2</b> : l'analyse granulométrique du gravier (8/16) concassé : .....	- 73 -
<b>Tableau 4-3</b> : L'analyse granulométrique d'un sable concassé 0/5 : .....	- 74 -
<b>Tableau 4-4</b> : Masse volumiques apparente de gravier3/8 .....	- 75 -
<b>Tableau 4-5</b> : Masse volumiques apparente de gravier8/16 .....	- 75 -
<b>Tableau 4-6</b> : Masse volumiques absolue de gravier3/8.....	- 76 -
<b>Tableau 4-7</b> : Masse volumiques absolue de gravier8/16.....	- 77 -
<b>Tableau 4-8</b> : Equivalent du sable concassé. ....	- 78 -
<b>Tableau 4-9</b> : Comparaison des résultats.....	- 79 -
<b>Tableau 4-10</b> : Masses volumiques apparentes de sable concassée 0.5. ....	- 80 -
<b>Tableau 4-11</b> : Masses volumiques absolues de sable concassée 0.5 .....	- 81 -
<b>Tableau 4-12</b> : La porosité, la compactée. L'indice de vide pour le sable concassé .....	- 82 -
<b>Tableau 4-13</b> : Valeurs du coefficient granulaire G .....	- 87 -
<b>Tableau 4-14</b> : Valeur du terme correcteur K .....	- 88 -
<b>Tableau 4-15</b> : Coefficients de compacité.....	- 89 -
<b>Tableau 4-16</b> : Classement des bétons selon la valeur d'affaissement au cône d'Abrams. ....	- 96 -

*Introduction*

*Générale*

## *Introduction Générale*

Les matériaux cimentaires sont largement utilisés dans le domaine du Génie Civil. Dans de multiples cas pratiques, ces matériaux peuvent être soumis de façon simultanée à des chargements mécaniques et à des températures relativement élevées.

L'augmentation de la température de mûrissement peut accélérer l'hydratation du liant ce qui influe sur sa résistance et sa durabilité.

La maturation du béton est communément admise comme étant le paramètre principal responsable du bon développement des propriétés du matériau. Dans des conditions de température élevée, la pâte de ciment subit des changements physiques et chimiques qui peuvent affecter significativement les propriétés mécaniques et la durabilité des structures en béton.

La température de mûrissement peut affecter les caractéristiques du béton. La température est une variable clé des conditions de durcissement des bétons, car elle influe sur l'hydratation et les propriétés de la pâte de ciment ou du béton durci. La température d'hydratation a un impact significatif sur l'hydratation de la pâte de ciment et du béton.

À court terme : du fait de cette croissance accélérée des produits d'hydratation ciment, l'augmentation de la température de mûrissement accélère la prise et le durcissement du béton ce qui permet un décoffrage rapide à court terme, se traduisant par un gain accéléré de résistance. La résistance en compression à 28 jours peut être atteinte en seulement 24 heures.

À long terme : l'effet de l'augmentation de la température sur la résistance s'inverse entre 7 et 15 jours. En effet, une vitesse d'hydratation initiale rapide due à des températures élevées conduit à une distribution non uniforme des produits hydratés.

Ainsi, plus la température de mûrissement est élevée, plus la résistance à court terme est élevée. Alors qu'à long terme, l'influence de la température est inversée, c'est-à-dire que plus la température initiale est élevée, moins bonnes sont les résistances.

Dans ce travail, l'étude du comportement mécanique et la durabilité du béton contenant une poudre issue de brique concassée sont présentées. L'étude expérimentale

est réalisée sur des échantillons de béton qui ont subis des modes de conservation différentes.

Ainsi des essais de résistance et de durabilité ont été réalisés.

Organisation du mémoire :

Le présent mémoire se divise en 4 chapitres.

- *CHAPITRE I : Le premier chapitre présente des généralités sur la fabrication et les constituants de ciment*
- *CHAPITRE II : Effet des conditions de mûrissement et de cure sur les caractéristiques du béton*
- *CHAPITRE III : Recyclage, préparation des déchets et utilisation dans le béton*
- *CHAPITRE IV : Dans ce chapitre, on présente une étude expérimentale de notre sujet avec la représentation des résultats interprétation*

*Chapitre 01 :*

*Généralités sur la*

*fabrication et les*

*constituants de*

*ciment*

# ***1. Généralités sur la fabrication et les constituants de ciment***

## ***Introduction***

Le béton est un matériau de construction incontournable, reconnu pour sa résistance mécanique, son coût relativement faible et sa facilité d'utilisation. Sa formulation classique repose sur un mélange de granulats et de ciment, dont l'hydratation produit des hydrates assurant la cohésion de la matrice. La résistance mécanique du béton évolue progressivement, atteignant environ 75 % de sa valeur finale après sept jours. Cependant, face aux préoccupations environnementales croissantes, liées notamment aux émissions de CO<sub>2</sub> issues de la production du ciment, de nouvelles approches sont explorées pour améliorer la durabilité des bétons et réduire leur impact écologique.

L'intégration de matériaux recyclés, tels que la poudre de brique, dans la formulation du béton s'inscrit dans cette dynamique. Toutefois, les propriétés mécaniques de ces bétons modifiés peuvent être influencées par plusieurs paramètres, notamment la température de CO<sub>2</sub> murissement. Ce travail de recherche vise ainsi à étudier l'effet de la température de cure sur les caractéristiques mécaniques du béton incorporant de la poudre de brique recyclée, afin d'évaluer son potentiel en tant que matériau de construction durable.

## ***1.1. Constituants et hydratation de ciment :***

### **Définition de ciment :**

Le ciment est un liant hydraulique fait de calcaire pour les matières premières, marne et gypse nous entendons par liant hydraulique c'est un produit de durcissement dans l'air et l'eau après le mélange avec de l'eau. L'aggloméré de ciment qui en résulte est étanche et a une bonne résistance à la pression. « C'est la principale composante du béton, ce qui lui confère un certain nombre de caractéristiques, y compris sa puissance. Il est considéré comme un matériau de construction économique de haute qualité, utilisé dans la plupart des projets de construction à travers le monde [1].

## Chapitre 01 : généralités sur la fabrication et les constituants de ciment



Figure 1-1 : Le ciment

Pour fabriquer du ciment, il faut réunir quatre éléments principaux selon des dosages préétablis : la chaux, la silice, l'alumine, l'oxyde de fer. L'élément prépondérant étant le calcaire, La cimenterie est d'ailleurs implantée à proximité d'un important gisement de cette matière. L'ensemble de ces éléments, appelé cru, est ensuite traité par voie sèche.

### Etapes de fabrication de ciments :

Le ciment Portland courant est obtenu à partir d'un mélange composé majoritairement de calcaire (environ 80 %) et d'argile (environ 20 %). Ce mélange est soumis à une montée progressive en température jusqu'à environ 1450 °C, suivie d'un refroidissement rapide. Ces étapes thermiques provoquent une série de réactions chimiques complexes conduisant à la formation du clinker. Ce dernier est ensuite broyé finement en présence de gypse, et éventuellement d'autres constituants, afin de produire le ciment. [2]

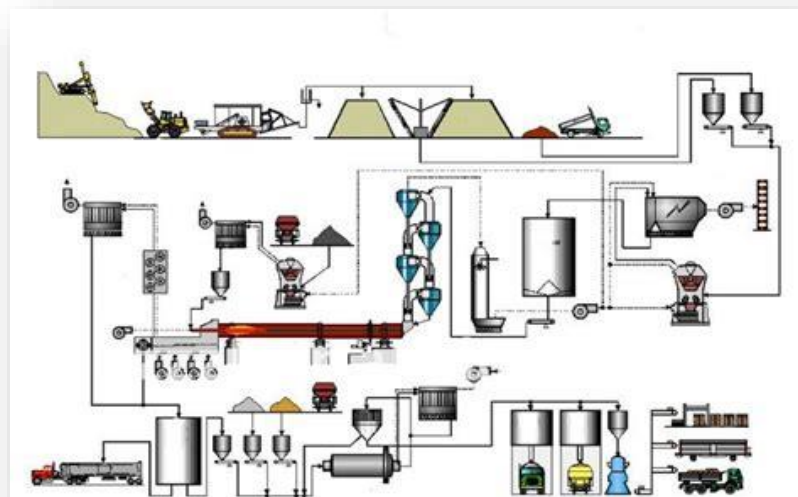


Figure 1-2 : Etapes de fabrication de ciments

## *Chapitre 01 : généralités sur la fabrication et les constituants de ciment*

### **1.1.1.1. Extraction des matières premières :**

L'extraction des matières premières nécessaires à la fabrication du ciment débute par l'abattage du calcaire à l'explosif dans des carrières à ciel ouvert, afin de le fragmenter en blocs transportables. Ces blocs sont ensuite chargés dans des dumpers pour être acheminés vers les concasseurs. L'argile, étant une roche plus meuble, est extraite à l'aide d'excavateurs ou de pelles à roue, puis transportée par camions.

Le mélange obtenu à partir du calcaire et de l'argile constitue la matière première du ciment, appelée communément « cru » ou « farine ». La préparation du cru consiste à homogénéiser ces deux composants selon des proportions définies, généralement proches du rapport standard de 80 % de calcaire pour 20 % d'argile, en tenant compte de leurs compositions chimiques spécifiques. Cette opération peut être réalisée selon différents procédés technologiques : par voie sèche, voie humide, voie semi-sèche ou voie semi-humide. [2]



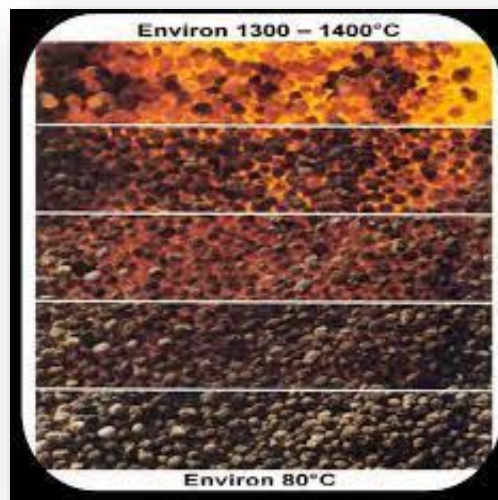
**Figure 1-3 :** Extraction des matières premières

### **1.1.1.2. Cuisson :**

Le cru est ensuite introduit dans un four rotatif, légèrement incliné, dont les dimensions typiques avoisinent 5 mètres de diamètre et de 80 à 100 mètres de longueur. À l'intérieur de ce four, le cru est soumis à une cuisson à haute température, généralement comprise entre 1400 et 1500 °C. Ce traitement thermique, qui s'accompagne d'émissions de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), permet la transformation chimique du mélange en clinker, constituant principal du ciment. [3]



**Figure 1-4 :** Zone de cuisson.



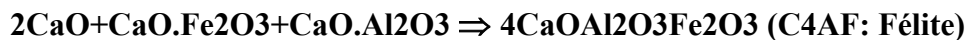
**Figure 1-5 :** Clinker à la sortie de four et après le refroidissement.

Les réactions chimiques de transformation du cru dans le four se déroulent comme suit :

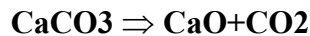
- Jusqu'à 100 °C : évaporation de l'eau libre présente dans le mélange.
- Entre 450 et 550 °C : élimination de l'eau constitutive contenue dans les minéraux.

## *Chapitre 01 : généralités sur la fabrication et les constituants de ciment*

- À partir de 650 °C : formation des aluminates et des ferrites de calcium.



- *À partir de 700°C: Décarbonatation du calcaire.*

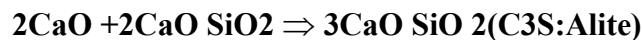


- *Vers 900°C: Formation du silicate bicalcique (2CaO, SiO<sub>2</sub>)*



- *À partir de 1250°C : le silicate tri calcique appelé 'Alite' commence à apparaître*

- *Partir de la chaux et de la Bélite.*



- *Entre 1260 et 1450°C: apparition du premier liquide.*

- *T = 1450°C: Clinkérisation.*

**Tableau 1-1 : Composition chimique de clinker**

Composant	Formule	Min
Alite (silicate tricalcique)	Ca <sub>3</sub> SiO <sub>5</sub>	45.0%
Bélite (silicate bicalcique)	Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	5.7%
Aluminate tricalcique	Ca <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	1.1 %
Aluminoferrite tétracalcique	Ca <sub>4</sub> Al <sub>2</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>10</sub>	2.0%
Chaux libre	CaO	0.6%

### **1.1.1.3. Refroidissement :**

Une fois le clinker sorti du four, il doit être rapidement refroidi à l'aide d'un système de refroidissement à grille. Le clinker avance à l'intérieur du refroidisseur grâce aux mouvements répétitifs des grilles sur lesquelles il repose. De puissants ventilateurs, situés sous ces grilles, soufflent de l'air à haute pression pour accélérer le refroidissement. Selon le modèle du refroidisseur, un concasseur placé à l'entrée ou à la sortie broie grossièrement le clinker à l'aide d'un ou plusieurs cylindres. Ce refroidissement brutal joue un rôle essentiel dans la formation des phases minérales du clinker ainsi que dans l'interaction entre ses différents constituants.[4]

**1.1.1.4. Broyage :**

Le broyage est effectué en continu dans des broyeurs alimentés à partir des stocks de clinker ainsi que des différents constituants et ajouts. Cette opération vise, d'une part, à réduire le clinker en une fine poudre, et d'autre part, à incorporer le gypse, dont le rôle est de réguler le temps de prise. D'autres ajouts éventuels, tels que le filler calcaire, le laitier de haut fourneau ou les cendres volantes, peuvent également être introduits afin de produire les différents types de ciments normalisés.



**Figure 1-6 :** Broyage la matière première

**1.1.1.5. Les ajouts :**

Cette étape consiste à doser différents composants du ciment. Ainsi, plusieurs types de ciments peuvent être obtenus en fonction des ajouts, appelés "constituants secondaires" ou "ajouts". En général, une petite quantité de gypse (entre 3 et 5 %) est incorporée au clinker afin de réguler les caractéristiques de prise du ciment. Le clinker constitue généralement la base du produit final, notamment pour le ciment Portland, mais il peut également être mélangé et broyé avec d'autres matériaux industriels ou naturels tels que le laitier de haut fourneau (pour produire du ciment écologique), les cendres volantes provenant des centrales thermiques au charbon, ou encore des fillers, souvent à base de calcaire. Ces ajouts permettent d'obtenir différentes catégories de ciment adaptées à des usages allant des applications courantes aux travaux les plus exigeants.

**Constituent du ciment :**

Le ciment est obtenu par le broyage de plusieurs composants, notamment le clinker, le gypse (sulfate de calcium) et divers additifs minéraux actifs.

## Chapitre 01 : généralités sur la fabrication et les constituants de ciment

- Le **clinker**, composant principal du ciment, est constitué principalement de silicates de calcium ( $C_3S$  et  $C_2S$ ) et d'aluminates de calcium ( $C_3A$  et  $C_4AF$ ).

En complément du clinker, d'autres matériaux sont introduits pour produire différents types de ciment. Il s'agit notamment du laitier de haut fourneau, des cendres volantes, du calcaire, de la fumée de silice, des fillers et du gypse. Lorsque la teneur massique de ces ajouts dépasse 5 %, ils sont considérés comme des constituants majeurs ; dans le cas contraire, ils sont qualifiés de constituants mineurs.

### Types du ciment :

Tableau 1-2 : les types des différents ciments

Différents types de ciments			
Type de ciment	Désignation	Constituants principaux	Utilisations courantes
CEM I	Ciment Portland	Clinker (95–100 %) + gypse	Béton armé, structures classiques
CEM II	Ciment Portland composé	Clinker (65–94 %) + ajouts (laitier, cendres volantes, calcaire...)	Ouvrages généraux, génie civil, constructions en masse
CEM III	Ciment haut fourneau	Clinker (5–64 %) + laitier de haut fourneau (36–95 %)	Milieus agressifs (sulfates, eau de mer)
CEM V	Ciment pouzzolanique	Clinker (45–89 %) + pouzzolanes naturelles ou industrielles	Travaux hydrauliques, environnement agressif Travaux souterrains, environnement marin ou sulfaté

### L'hydratation du ciment :

L'ajout d'eau au ciment entraîne une transformation rapide du mélange liquide en une masse solide. Ce phénomène résulte du processus d'hydratation du ciment. Il s'agit d'un ensemble complexe de réactions chimiques entre l'eau et les principaux constituants du ciment ( $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$  et  $C_4AF$ ), aboutissant à la formation de nouveaux composés insolubles. Ces produits d'hydratation contrôlent progressivement la prise et la solidification de la pâte cimentaire.

## ***Chapitre 01 : généralités sur la fabrication et les constituants de ciment***

L'analyse des réactions d'hydratation des composants du ciment permet de mieux comprendre les mécanismes internes de durcissement, bien que dans la réalité, ces réactions se produisent simultanément et de manière interdépendante. [5]

### **1) Hydratation du silicate tricalcique (C<sub>3</sub>S) :**

En présence d'eau, le silicate tricalcique (C<sub>3</sub>S) subit une dissolution superficielle, libérant des ions silicate (H<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), des ions hydroxyles (OH<sup>-</sup>) et des ions calcium (Ca<sup>2+</sup>) dans la solution. Cette réaction conduit à la formation de trois produits distincts, dont le principal est le silicate de calcium hydraté (C-S-H), [6]

Selon l'équation suivante :



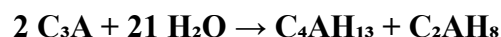
### **2) Hydratation du silicate bicalcique (β-C<sub>2</sub>S) :**

Le silicate bicalcique réagit avec l'eau d'une manière similaire au silicate tricalcique, en formant également des produits de type C-S-H, bien que leur microstructure puisse différer légèrement. Toutefois, les différences principales résident dans l'absence d'une forte sursaturation en portlandite et dans une libération de chaleur moins importante. Étant donné que le degré de sursaturation influence la germination de la portlandite, la faible sursaturation autour des grains de β-C<sub>2</sub>S pourrait expliquer sa réactivité moindre par rapport à celle du C<sub>3</sub>S à un jeune âge. [6]

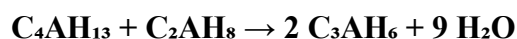
### **3) Hydratation de l'aluminate tricalcique (C<sub>3</sub>A) :**

Les recherches sur l'hydratation du C<sub>3</sub>A montrent clairement que cette réaction exerce une influence significative sur le comportement rhéologique initial du ciment. Contrairement aux phases silicatées, le sulfate de calcium (gypse) joue un rôle déterminant dans l'hydratation du C<sub>3</sub>A. Les produits d'hydratation varient considérablement selon que le processus se déroule en présence ou en absence de gypse, notamment en termes de morphologie, structure et composition.

En l'absence de gypse, une réaction rapide se produit, conduisant à la formation d'hydrates d'aluminate de calcium hexagonaux, selon l'équation suivante :



Cependant, ces hydrates hexagonaux sont instables et se transforment progressivement sous l'effet de la chaleur dégagée par l'hydratation du C<sub>3</sub>A, en un hydrate cubique plus stable, le C<sub>3</sub>AH<sub>6</sub>, selon la réaction suivante :



## Chapitre 01 : généralités sur la fabrication et les constituants de ciment

Ces réactions sont la principale cause de la prise rapide du ciment Portland lorsque la teneur en gypse est insuffisante. [6]

### 4) Hydratation de l'alumino-ferrite de calcium (C<sub>4</sub>AF) :

L'hydratation du C<sub>4</sub>AF est similaire à celle du C<sub>3</sub>A, mais se déroule de manière plus lente. Elle reste encore partiellement comprise et est souvent négligée dans les études traitant de l'hydratation du ciment. [6]

Les réactions chimiques associées à cette hydratation varient selon la présence ou non de gypse :

- **Sans gypse :**  $C_4AF + H_2O \rightarrow C_4(AF)H_{13}$
- **Avec gypse :**  $C_4AF + \text{gypse} + H_2O \rightarrow C_4(AF)SH_{12}$

### Différents types de pâte de ciment hydratée :

La pâte de ciment hydratée résulte de la réaction chimique entre l'eau et le ciment, connue sous le nom de réaction d'hydratation. Elle est constituée de divers composés formés au cours de ce processus. Les principaux constituants de la pâte de ciment hydratée sont des hydrates issus de la transformation des composés anhydres du ciment en produits hydratés solides. [7]

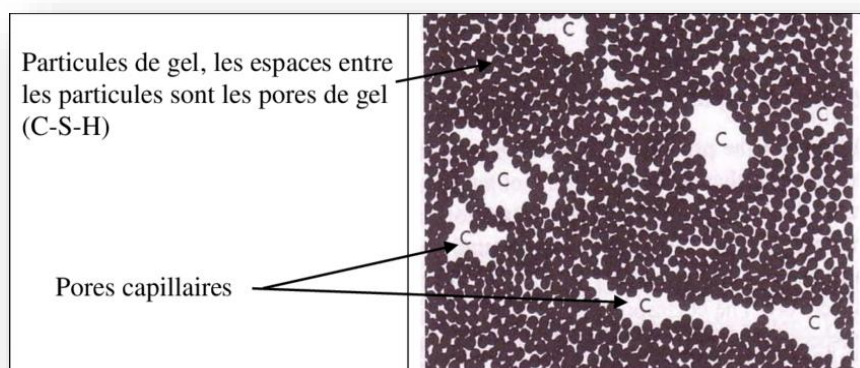


Figure 1-7 : Modèle simplifié d'une pâte de ciment hydratée

### La chaux hydratée (Ca(OH)<sub>2</sub>) :

La chaux hydratée résulte de la réaction entre les ions calcium (Ca<sup>2+</sup>) et les ions hydroxyde (OH<sup>-</sup>). Elle joue un rôle essentiel dans le processus de prise du ciment. Toutefois, une quantité excessive de chaux hydratée peut entraîner des phénomènes de fissuration et nuire à la durabilité du béton. [7]

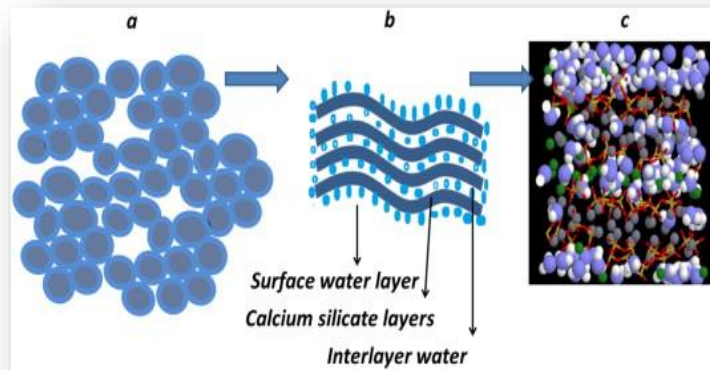


Figure 1-8 : Les Silicates De Calcium Hydraté C-S-H

### Les phases cristallines :

Le clinker de ciment est constitué de plusieurs phases cristallines, notamment le silicate tricalcique ( $C_3S$ ), le silicate dicalcique ( $C_2S$ ), l'aluminate tricalcique ( $C_3A$ ) et la ferrite tétracalcique ( $C_4AF$ ). Lors du processus d'hydratation, ces phases se dissolvent progressivement pour former des produits hydratés tels que le gel de silicate de calcium hydraté (C-S-H) et la chaux hydratée. [7]

### Le rôle du gypse dans le ciment :

Le gypse, ou sulfate de calcium dihydraté ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ), est ajouté au ciment lors du broyage du clinker pour réguler le temps de prise et éviter la prise instantanée (prise flash). Le gypse ralentit la réaction des aluminates (comme le  $C_3A$ ) avec l'eau, permettant ainsi un temps de travail plus long et empêchant un durcissement trop rapide qui rendrait le ciment difficile à manipuler.

Il réagit avec les aluminates pour former de l'**ettringite** ( $C_6AS_3H_{32}$ ), ce qui ralentit la réaction initiale et aide à **réguler la chaleur de réaction**, réduisant ainsi les problèmes comme **les fissures ou l'expansion**. Le gypse améliore également la **résistance à la corrosion** et renforce la **résistance du ciment dans les environnements agressifs**. Cependant, il est crucial de contrôler la quantité de gypse ajoutée, car une quantité insuffisante peut entraîner une **prise rapide**, tandis qu'un excès peut provoquer des **expansions indésirables** dans le béton à long terme.

### 1.2. La structure poreuse du béton :

Les agressions chimiques auxquelles le béton peut être exposé résultent principalement d'un déséquilibre entre la solution interstitielle présente dans les pores du matériau et son environnement. La durabilité du béton dépend donc fortement de sa capacité à échanger avec le milieu extérieur, capacité elle-même influencée par la nature des phases présentes et par les caractéristiques de sa structure poreuse.

Ainsi, assurer une compacité élevée demeure un critère fondamental pour garantir une bonne durabilité. Étant un matériau composite formé d'une phase granulaire (les

## Chapitre 01 : généralités sur la fabrication et les constituants de ciment

granulats) et d'une phase liante (la pâte de ciment), la structure poreuse du béton dépend de la disposition des granulats ainsi que de l'organisation interne de la phase liante.

Pour concevoir un béton durable, il est donc nécessaire d'optimiser la structure granulaire et de viser une pâte liante dense, tout en respectant les exigences de fabrication, notamment les propriétés à l'état frais compatibles avec les méthodes de mise en œuvre.[8]

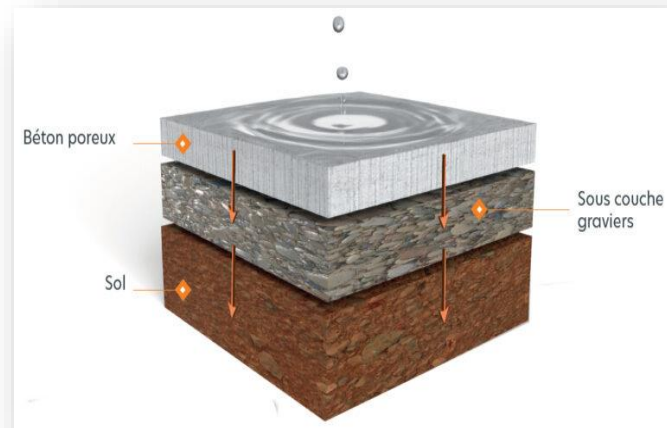


Figure 1-9 : La structure poreuse du béton

### Description de la structure poreuse du béton :

La durabilité du béton est liée à sa capacité d'échange avec l'environnement extérieur. Le béton est un matériau hétérogène composé de trois phases : une phase solide, une phase liquide et une phase gazeuse. La partie solide est constituée d'agrégats, de produits d'hydratation, ainsi que de grains de ciment non hydratés, tandis que la phase gazeuse est composée d'un mélange d'air et de vapeur d'eau. [8]

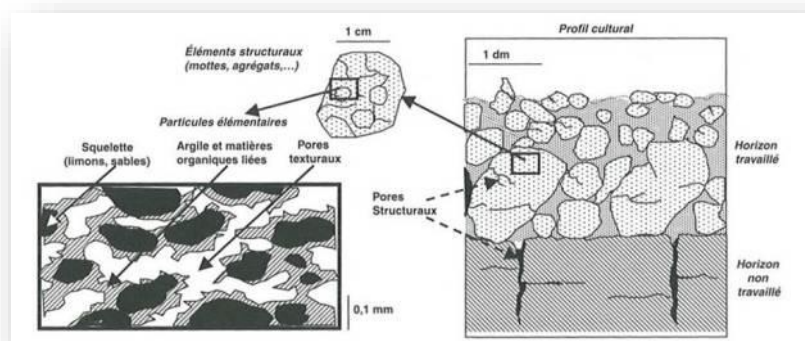


Figure 1-10 : Schéma des pores dans un matériau

## Chapitre 01 : généralités sur la fabrication et les constituants de ciment

Les pores présents dans le béton peuvent être décrits de la manière suivante :

- **V<sub>a</sub>** : le volume apparent contenu dans l'enveloppe du matériau,
- **V<sub>s</sub>** : le volume de la partie solide du matériau,
- **V<sub>o</sub>** : le volume des pores ouverts, c'est-à-dire en communication avec l'extérieur,
- **V<sub>o,i</sub>** : le volume des pores ouverts interconnectés, à travers lesquels un fluide peut traverser le matériau,
- **V<sub>o,ni</sub>** : le volume des pores ouverts non interconnectés,
- **V<sub>f</sub>** : le volume des pores fermés.

Les relations entre ces volumes s'expriment comme suit :

$$\Rightarrow V = V_o + V_f$$

$$\Rightarrow V_o = V_{o,i} + V_{o,ni}$$

La porosité peut être définie en fonction de ces volumes :

- **Porosité ouverte interconnectée** :  $P_{o,i} = V_{o,i} / V_a$
- **Porosité ouverte non interconnectée** :  $P_{o,ni} = V_{o,ni} / V_a$
- **Porosité ouverte totale** :  $P_o = V_o / V_a = P_{o,i} + P_{o,ni}$
- **Porosité fermée** :  $P_f = V_f / V_a$
- **Porosité totale** :  $P = V / V_a = P_o + P_f$

Les différentes propriétés d'usage du béton sont influencées par les types de porosité décrits ci-dessus. En particulier, la durabilité est fortement liée à la porosité ouverte, et plus précisément à la porosité ouverte interconnectée, qui permet la pénétration des agents agressifs dans le béton.

### Distribution et taille des pores dans le béton :

La distribution des pores dans le béton couvre une large gamme de tailles : pores capillaires, pores internes aux hydrates, bulles d'air et fissures.

Dans le cas du béton, on distingue généralement deux catégories principales de pores :

- ✚ Les **pores capillaires**
- ✚ Les **pores internes aux hydrates**

Les pores capillaires peuvent être détectés à l'échelle à l'aide de la porosimétrie au mercure. Ils se forment entre les particules solides et sont directement influencés par le rapport eau/ciment (E/C) du mélange.

Les pores internes aux hydrates, tels que les pores intercrystallins et interstitiels, sont beaucoup plus fins que les pores capillaires. Ils résultent directement de la formation des

## *Chapitre 01 : généralités sur la fabrication et les constituants de ciment*

produits d'hydratation du ciment et sont donc indépendants du rapport E/C. Ce type de porosité peut être observé par des techniques d'adsorption de gaz. [8]

### **1.2.1.1. Pores relatifs aux capillaires :**

Les pores capillaires représentent les restes des espaces intergranulaires présents dans la pâte fraîche. Ils peuvent être remplis ou non d'eau, et leur volume tend à diminuer progressivement au cours de l'hydratation pour un rapport eau/ciment donné. Le volume et la taille de ces pores diminuent avec la réduction du rapport E/C à un âge donné. Une représentation schématique permet de visualiser le type de distribution podométrique pouvant exister au sein d'une pâte de ciment durcie. [9]

### **1.2.1.2. Pores relatifs aux hydrates :**

Cette porosité concerne une échelle encore plus fine, celle du gel C-S-H. Les représentations associées à cette porosité distinguent généralement deux types de pores :

- Les **pores inter-lamellaires** (ou inter-cristallins), situés entre les particules de gel,

Les **pores intra-lamellaires** (ou intra-cristallins), localisés à l'intérieur même des particules de gel. Il s'agit d'espaces extrêmement petits, de l'ordre de quelques angströms. [9]

### **1.2.1.3. Autres types de pores :**

Pour une description complète de l'espace poreux dans le béton, il est également nécessaire de prendre en compte les vides issus des inclusions d'air. Ceux-ci proviennent soit de l'air occlus lors du malaxage, soit de l'air entraîné volontairement par l'ajout d'un adjuvant. Ce type de porosité est généralement classé comme porosité fermée et a peu d'impact sur les transferts hydriques. On exclut ici les fissures (de taille supérieure à 100  $\mu\text{m}$ ), qui relèvent le plus souvent de phénomènes liés à des sollicitations mécaniques et/ou thermiques. [9]

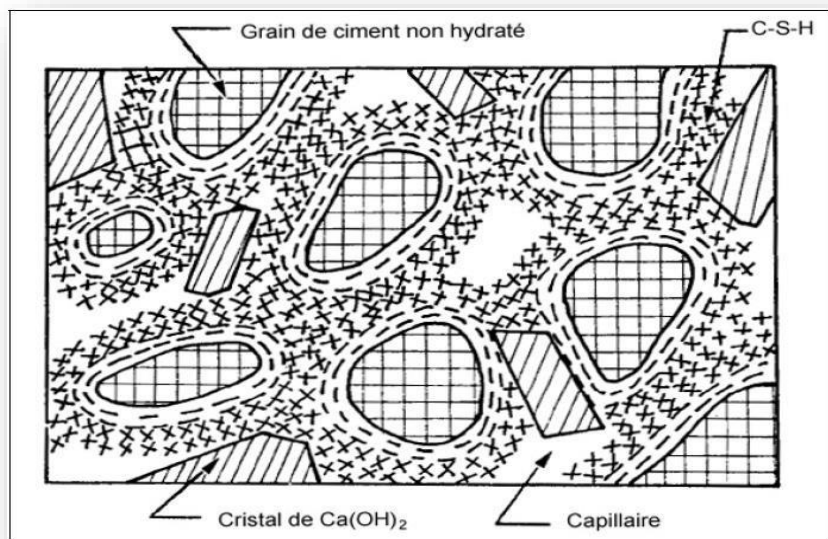


Figure 1-11 : Illustration des différentes formes de porosité dans la pâte de ciment durcie

#### Interface des paires sur les caractéristiques :

Lors de l'hydratation du ciment, une liaison se forme entre la pâte de ciment et les granulats. Cette interface dépend de la nature des phases en présence, de la teneur en ciment et des conditions de stockage. Au contact de l'agrégat, se développe une zone de pâte à humidité particulière, appelée zone de transition interfaciale (ITZ). Cette zone présente généralement un rapport eau/ciment (E/C) plus élevé que le reste de la pâte, ce qui entraîne une porosité plus importante. L'ITZ est donc moins résistante que la pâte de ciment elle-même. Les pores qui s'y trouvent sont plus grossiers et structurellement faibles. De plus, l'épaisseur de l'ITZ augmente avec le diamètre des granulats et la quantité d'eau utilisée pour l'hydratation, c'est-à-dire avec un rapport E/C plus élevé. [10]

#### Effet de la formulation sur les caractéristiques du béton :

✚ **Type de ciment** : Le type de ciment utilisé dans la formulation du béton influence directement sa structure poreuse. Les différents types de ciment, tels que le ciment Portland ordinaire, le ciment Portland à haute performance (CPA) ou le ciment résistant à haute température et à faible teneur en humidité, possèdent des caractéristiques spécifiques qui peuvent modifier la pression interne et la distribution des pores dans le béton. Certains de ces ciments permettent de réduire la porosité, contribuant ainsi à améliorer la résistance et la durabilité du matériau [11]

## *Chapitre 01 : généralités sur la fabrication et les constituants de ciment*

- ✚ **Rapport eau-ciment** : Le rapport eau/ciment (E/C) représente la proportion entre la quantité d'eau et celle de ciment utilisé dans le mélange de béton. Un rapport E/C élevé augmente la porosité du béton, car il crée davantage d'espaces vides. En revanche, un rapport plus faible favorise une densité plus élevée et une réduction significative de la porosité, ce qui améliore généralement les propriétés mécaniques et la durabilité du béton. [11]
  
- ✚ **Conditions d'hydratation** : Les conditions d'hydratation, telles que la température, l'humidité relative et la durée du processus, jouent un rôle essentiel dans l'évolution de la porosité du béton. Des températures élevées peuvent accélérer la réaction d'hydratation et contribuer à une réduction plus rapide de la porosité. De même, une humidité relative importante et une période d'hydratation prolongée permettent une hydratation plus complète des constituants cimentaires, ce qui conduit généralement à une structure plus dense et à une porosité réduite. [12]
  
- ✚ **Mode d'eau** : L'eau de gâchage joue un rôle essentiel dans l'hydratation du ciment et facilite la mise en œuvre du béton, mais un excès d'eau diminue sa résistance et augmente sa porosité. L'eau utilisée doit être propre et exempte d'impuretés, l'eau potable étant la plus recommandée selon la norme EN 1008. L'utilisation de l'eau de mer est à éviter, surtout dans le béton armé. La quantité d'eau influe directement sur les propriétés du béton : une partie sert à l'hydratation, l'autre améliore la maniabilité. L'ajout d'adjuvants permet de réduire la quantité d'eau sans compromettre la qualité du béton durci.
  
- ✚ **Temps de prise** : pour des températures moins de (26 C°), le temps de prise du béton contenant du laitier peut être plus long que celui du béton de ciment portland, en particulier par temps froid, la prise plus lente dépendra de la réactivité du laitier et de son pourcentage dans le mélange [13].
  
- ✚ **Adjuvants** : Les adjuvants sont des substances chimiques ajoutées en petites quantités au béton afin de modifier ses propriétés, que ce soit à l'état frais (comme la maniabilité ou le temps de prise) ou à l'état durci (comme la résistance ou la durabilité). Ces produits comprennent les plastifiants, les superplastifiants, les accélérateurs, les retardateurs, les entraîneurs d'air, entre autres. Leur efficacité dépend de plusieurs facteurs tels que le type de ciment et les conditions de mise en œuvre. Une utilisation appropriée des adjuvants permet d'améliorer les performances du béton et de répondre aux exigences techniques et environnementales

## ***Chapitre 01 : généralités sur la fabrication et les constituants de ciment***

- ✚ ***Additions minérales*** : Les additions minérales, comme les cendres volantes, le laitier de haut fourneau ou les fumées de silice, peuvent être incorporées au mélange de béton. Ces matériaux interagissent avec les produits issus de l'hydratation du ciment et contribuent à combler les pores du béton, ce qui réduit sa porosité. En plus de densifier la matrice, ces additions améliorent également la compacité et la résistance mécanique du béton. [14]

### ***Conclusion***

Le béton est un matériau composite dont les propriétés mécaniques et la durabilité dépendent fortement de sa microstructure. L'interface pâte-granulat, appelée zone de transition interfaciale (ITZ), est une région critique caractérisée par une porosité élevée et une résistance réduite, influencée par le rapport eau/ciment, la nature et la taille des granulats. L'ajout de fumée de silice dans les bétons à haute performance réduit l'épaisseur et la porosité de l'ITZ, améliorant ainsi la cohésion pâte-granulat.

Par ailleurs, la microstructure du ciment, composée de C-S-H, de portlandite et de pores capillaires, joue un rôle essentiel dans les transferts de fluides et la résistance du béton. Elle dépend de la composition du ciment, du rapport E/C et des conditions d'hydratation. La maîtrise de ces paramètres permet d'optimiser les performances du béton pour les applications en génie civil.

*Chapitre 02 :*  
*Effet des conditions*  
*de mûrissement et de*  
*cure sur les*  
*caractéristiques du*  
*béton*

## ***2. Effet des conditions de mûrissement et de cure sur les caractéristiques du béton***

### ***Introduction***

La cure consiste en les actions entreprises après le coulage du béton pour maintenir un niveau approprié d'humidité et de température à la surface, afin de garantir la continuation de l'hydratation du ciment et le développement de la résistance initiale du béton. La cure dure généralement entre 7 et 14 jours et utilise des techniques telles que l'arrosage, la couverture du béton avec des bâches ou l'application de produits de cure spécifiques. En revanche, la maturation (le mûrissement) fait référence au processus interne qui se poursuit après la cure, durant lequel la résistance du béton continue de se développer avec le temps en raison de la poursuite de l'hydratation à l'intérieur du béton. Contrairement à la cure, qui est une période relativement courte, la maturation peut durer plusieurs semaines voire plusieurs mois, et dépend des conditions thermiques et d'humidité internes du béton. Ainsi, la cure se concentre sur les facteurs externes immédiats, tandis que le mûrissement est un processus prolongé du développement des caractéristiques mécaniques au fil du temps.

### ***2.1. Différentes formes d'eau dans la pâte de ciment hydrate :***

L'eau constitue l'un des éléments essentiels dans la composition du béton. Lors du gâchage, elle joue un rôle fondamental en améliorant la fluidité et la maniabilité, ce qui facilite la mise en œuvre du matériau. Au moment de la prise, elle permet d'assurer la liaison entre les constituants solides du béton. Toutefois, elle contribue également à la formation des pores dans la structure, ce qui peut réduire la durabilité et affaiblir les performances mécaniques du béton. Selon sa position et la nature de son interaction avec les composants solides, l'eau peut exister sous différentes formes. Elle fait ainsi l'objet de diverses classifications, fondées soit sur des critères structuraux, soit sur des critères énergétiques. La classification adoptée ici se base sur la force croissante des liaisons entre l'eau et les éléments du béton.

## ***Chapitre 2 : Effet des conditions de mûrissement et de cure sur les caractéristiques du béton***

- ***L'eau combinée chimiquement :***

L'eau est dite combinée chimiquement lorsqu'elle réagit avec les composants des hydrates, entraînant une modification de sa structure par la rupture de la liaison covalente (O-H). Contrairement à l'adsorption physique, ce type de combinaison se produit exclusivement sur des sites spécifiques, tels que les défauts cristallins, et concerne généralement une seule couche moléculaire d'eau.

- ***L'eau inter-couche (ou zéolitique) :***

Se situe dans l'espace interfoliaire et possède un très faible degré de liberté. Ces molécules d'eau interfoliaires sont liées triplement par des ponts hydrogènes comme dans la structure de la glace et interviennent directement dans la cohésion intrinsèque de la lamelle. D'après Diamond [15] seul un puissant séchage permet d'extraire ces molécules d'eau et ceci de manière irréversible

- ***L'eau absorbée (ou adsorbée) :***

L'eau est dite absorbée lorsqu'il apparaît des forces intermoléculaires ou des forces électrostatiques entre la molécule d'eau et la surface solide. Elle est dite physique ou chimique suivant le type de liaison qu'elle entretient avec la particule solide.

- ❖ ***Eau adsorbée physiquement :***

L'eau adsorbée physiquement est le résultat de l'apparition d'une liaison de type Van de Waals entre les granulats, les grains de ciments et l'eau, suite à la condensation de la vapeur d'eau présente dans le matériau [16]. L'apparition de cette liaison ne modifie pas la structure de la molécule d'eau d'où le terme d'absorption physique. Cette eau s'empile sur la surface solide sous forme de couches successives, de moins en moins ordonnées, du fait de la décroissance de l'énergie de liaison au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la surface des éléments solides [17]. Le nombre de couches adsorbées n'excède pas cinq et dépend du taux d'humidité relative présent dans les pores capillaires. Dès l'augmentation de la température, les liaisons se détruisent et les molécules d'eau se libèrent.

Le diamètre d'une molécule d'eau étant d'environ 2,6 Å, il faudrait que l'espace inter lamellaire soit de 26 Å pour que l'adsorption physique se déroule de manière libre. Cette espace n'étant en réalité de 17 Å, l'eau ne peut être adsorbée librement. Cette région est appelée zone d'adsorption empêchée. L'eau y est présente sous une forte pression, de l'ordre de 130 MPa [18], dite de disjonction. Cette pression s'oppose aux forces d'attraction qui s'exerce entre particules solides des C-S-H et qui permettent le maintien de la structure du squelette solide. Cette eau est ainsi un élément structurel à part entière du matériau, capable de transmettre localement les contraintes.

## *Chapitre 2 : Effet des conditions de mûrissement et de cure sur les caractéristiques du béton*

### *❖ Eau adsorbée chimiquement :*

L'eau est adsorbée chimiquement lorsqu'elle est combinée à d'autres composants dans les hydrates [17]. Sa structure s'en trouve alors modifiée par la dissociation de la liaison covalente (O-H). Contrairement à l'eau adsorbée physiquement, l'adsorption chimique s'effectue uniquement sur des sites privilégiés (par exemple sur les défauts cristallins) et sur une couche de molécule d'eau.

#### *• L'eau capillaire*

L'eau soumise à des forces d'attraction faibles à la surface des solides est appelée **eau capillaire** ou **eau libre**. Elle obéit aux lois de la capillarité et se trouve principalement dans les pores de diamètre supérieur à 10  $\mu\text{m}$ , où la phase liquide est séparée de la phase gazeuse par un ménisque. Selon Khoury (2005), lorsque la température augmente à une vitesse de 1  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , seulement 3 % de cette eau s'évapore à 100  $^{\circ}\text{C}$ , tandis que ce taux atteint 9 % si la vitesse est réduite à 0,2  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  [19]. Cela montre que la vitesse de chauffage influence fortement le processus de dessiccation du béton. Cette eau, fortement ionisée par rapport aux autres composants du béton, est la première à migrer et à s'évaporer.

### **2.2. Influence du rapport E/C sur la résistance de la pâte de ciment :**

Le rapport eau/ciment (E/C) d'un matériau à matrice cimentaire comme le mortier et le béton peut représenter en première approximation la qualité de la matrice cimentaire. Nous présentons dans cette section des résultats, issus de la littérature, d'essais de compression simple, réalisés sur mortiers (ou bétons) avec différents rapports E/C.

La figure 2.1 montre que la courbe représentant la résistance en fonction du rapport E/C a approximativement la forme d'une hyperbole. Cette relation est valable pour n'importe quel béton quels que soient le type de granulat et l'âge. La résistance est d'autant plus élevée que le rapport E/C diminue. Une des propriétés géométriques d'une hyperbole ( $y=k/x$ ) est que la relation existante entre  $y$  et  $1/x$  est linéaire. La relation entre la résistance et le rapport C/E est donc approximativement linéaire pour des valeurs du rapport C/E compris entre environ 1,2 et 2,5. Cette relation linéaire, tout d'abord suggérée par Neville [20], a été confirmée par Alexander et Ivanusec [21] et par Kakizaki et al [22]. Cette relation est plus facile à utiliser que la courbe représentant le rapport eau/ciment, particulièrement lorsqu'une interpolation est nécessaire. La figure (II.2) présente les valeurs de la figure (II.1) en fonction du rapport ciment/eau porté en abscisses. Les valeurs indiquées sont applicables uniquement pour un ciment donné, la relation entre la résistance et rapport ciment/eau doit donc être déterminée pour tout autre cas pratique.

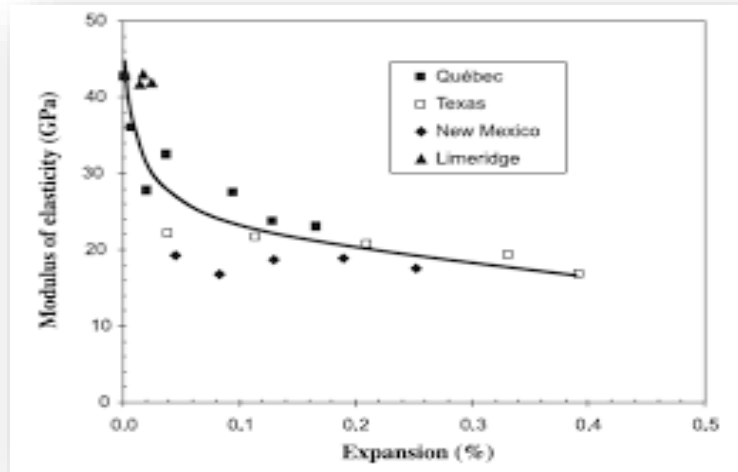


Figure 2-1 : Résistance en fonction du rapport E/C

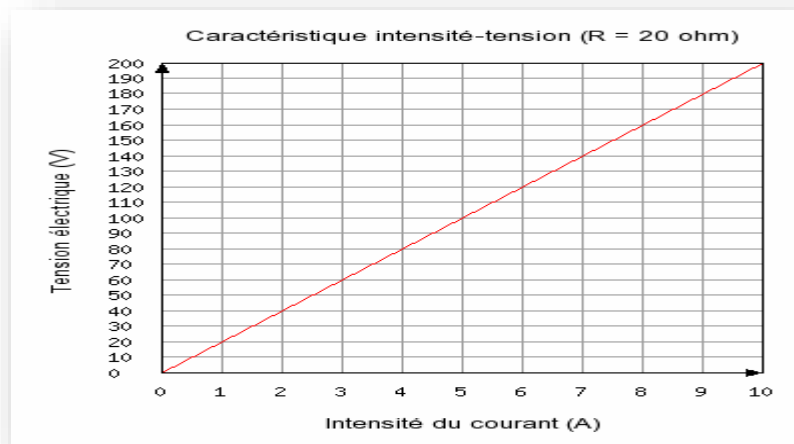
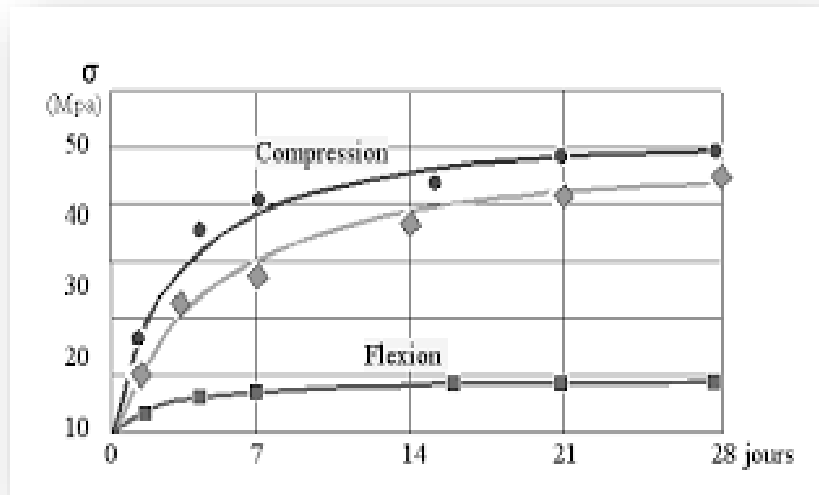


Figure 2-2 : Valeurs des résistances en fonction du rapport E/C.

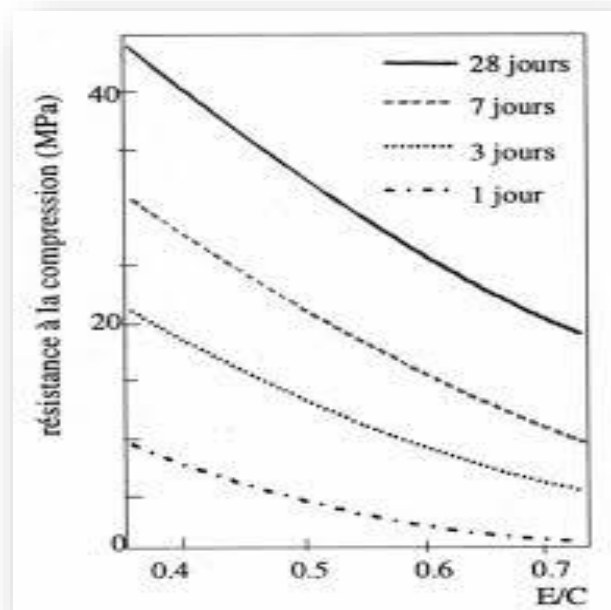
Nielsen (1993) [23] a montré que la linéarité de la relation entre la résistance et le rapport C/E n'est plus valable pour des rapports C/E supérieurs à 2.6, ce qui correspond à un rapport E/C égale à 0,38. Comme on le voit sur la figure II.3, pour des rapports C/E supérieurs à 2,6, la relation avec la résistance est quelque peu différente même si elle demeure linéaire.

## Chapitre 2 : Effet des conditions de mûrissement et de cure sur les caractéristiques du béton



**Figure 2-3** : Relation entre la résistance calculée d'une pâte pure de ciment et le rapport E/C [23].

Le rapport E/C conditionne aussi la porosité de la matrice cimentaire du béton durci, qui est un paramètre qui influe beaucoup sur la durabilité du béton [24]. La figure 2.4. montre que la résistance à la compression du béton est d'autant plus élevée que le rapport E/C diminue et que l'âge du béton est plus grand [25].



**Figure 2-4** : Influence du rapport E/C sur la résistance à la compression du béton [25].

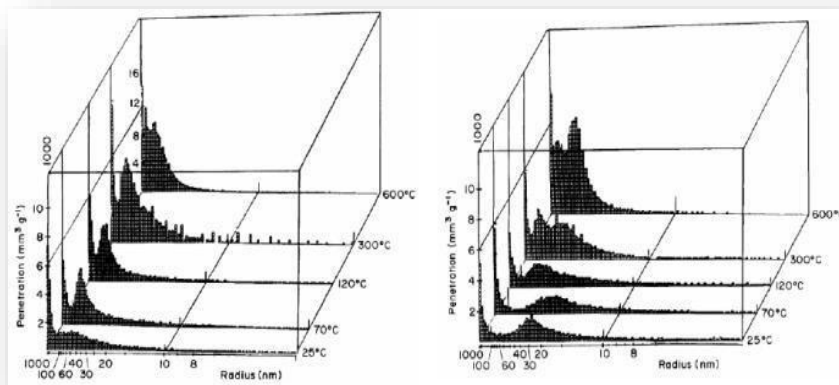
La résistance a été mesurée sur des cylindres de 15x30 cm et les bétons ont été préparés avec un ciment de type I (ASTM), sans air entraîné.

### 2.3. Méthodes de caractérisation de la porosité du béton :

Pour étudier la porosité d'un matériau cimentaire, deux méthodes sont fréquemment utilisées :

a) *Porosimétrie au mercure (MIP – Mercury Intrusion Porosimetry) :*

Cette technique met en évidence la distribution de la porosité en fonction de la taille des pores, elle permet de détecter les pores capillaires, dont la taille varie entre 4 nanomètres et quelques microns (7500 nm). L'étude de la variation de la porosité en fonction de la température a été menée par plusieurs chercheurs [Bazant Z.P et al], [Noumowé A] et [Alarcon-Ruiz L et al]. La (Figure II.5) présente les distributions des pores au sein d'un béton ordinaire chauffé jusqu'à 600°C par la technique de prosimètre au mercure. La synthèse des résultats obtenus par différents auteurs indique que dans le cas du béton ordinaire, la température engendre une augmentation du volume total ainsi que la dimension des pores. Elle peut être due à la rupture des cloisons capillaires sous l'effet de la vaporisation de l'eau durant le chauffage, ainsi qu'à la microfissuration engendrée par les dilatations différentielles de la matrice cimentaire et des granulats. [26]



**Figure 2-5 :** Distribution des pores dans les bétons chauffés obtenus par prosimètre au mercure. A gauche BO – à droite BHP.

b) *Porosité accessible à l'eau (Norme NF P 18-459):*

Cette technique permet de déterminer le volume de la porosité accessible à l'eau, donc la porosité capillaire. La méthode consiste en la réalisation d'une série des pesés du matériau saturé d'eau, à sec et par pesée hydrostatique. Les résultats des mesures de l'évolution de la porosité totale en fonction de la température réalisée par Kalifa et al.

[Kalifa P] par la méthode de saturation d'eau sur un béton ordinaire et un béton à haute performance sont représentés sur la (Figure 2.6) [26]

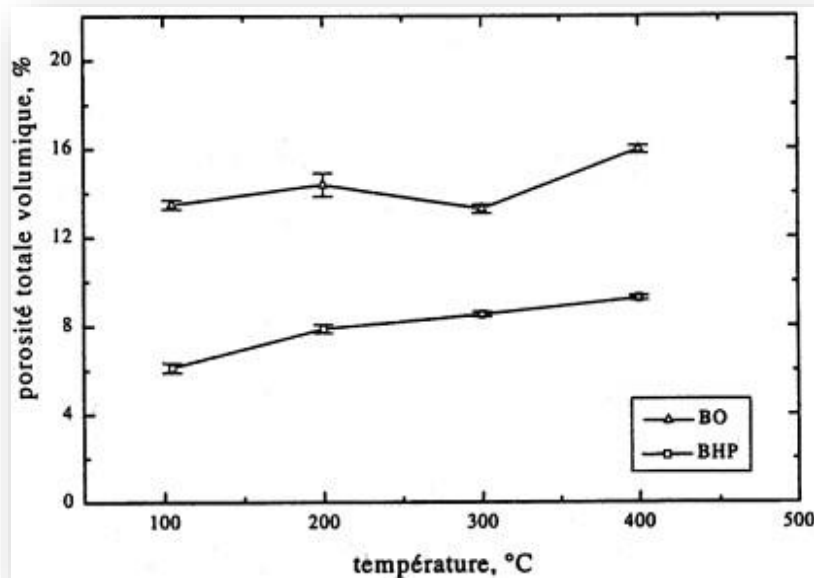


Figure 2-6: Porosité totale à l'eau en fonction de la température de conditionnement.

Entre 105°C et 400°C, la porosité de BHP augmente de 3%. Cette croissance est associée au départ d'eau, qu'elle soit présente dans le réseau ou chimiquement liée.

Kalifa explique que la diminution de porosité du BO entre 200°C et 300°C est associée à la densification due à l'hydratation complémentaire et à une carbonatation de la portlandite en condition d'autoclavage interne, c'est-à-dire sous une pression supérieure à la pression atmosphérique. Par contre, cette densification n'est pas observable dans le BHP qui contient très peu de portlandite grâce à la présence de fumée de silice.

La comparaison des valeurs de la porosité totale déterminée par les techniques d'intrusion de mercure et porosité à l'eau, montre que cette dernière technique conduit aux valeurs de porosité les plus élevées

c) *Analyse d'image (Microscopie optique ou électronique):*

Le microscope électronique à balayage (MEB) est un appareil d'analyse ; pouvant fournir rapidement des informations sur la morphologie et la composition chimique d'un objet solide [11] Le principe du MEB a été proposé par KNOLL dès 1935, Alors que ce dernier se développa très rapidement et devint opérationnel vers 1939, grandissement pouvant varier de quelques unités à 50000 ou 100000 [27]. Son utilisation est courante en biologie, chimie, métallurgie, médecine et géologie [28].

## **2.4. Facteurs influençant la résistance à la compression du béton**

### ***a. Porosité :***

Une autre propriété importante du béton est la porosité. Elle est définie comme le volume total des vides contenus dans le béton pour 1 m<sup>3</sup> de matériau. Cette porosité augmente avec le rapport E/C et est en général comprise entre 11 et 18%. Elle est constituée de pores plus ou moins interconnectés, ainsi que de micro ou macro-fissuration. Les Dimensions caractéristiques des pores vont d'une dizaine de nanomètres (10<sup>-10</sup>) au millimètre (10<sup>-3</sup>). Ils peuvent être remplis d'air ou d'eau libre suivant la teneur en eau libre du béton.

Cette teneur en eau libre désigne l'eau présente dans les vides du béton et ne participant pas à l'hydratation du ciment. On recherche particulièrement une faible porosité lors de la formulation du béton, qui assure une meilleure résistance mécanique du béton. La porosité du béton dépend du rapport E/C, un rapport E/C élevé induisant une plus forte porosité, mais également des conditions de cure ; l'hygrométrie doit être maintenue élevée pendant la cure afin d'assurer la meilleure hydratation possible du ciment, de même une augmentation de la durée de cure diminue le diamètre moyen des pores [Neville 2000, Baron et Sauterey 1982].

### ***b. Rapport E/C :***

Le dosage en eau qui se traduit par le rapport Eau/Ciment (E/C) est un paramètre déterminant vis-à-vis de la porosité, de la résistance et donc de la durabilité du béton. Plus le rapport E/C est faible plus ces propriétés sont favorisées. En règle générale le rapport E/C est compris entre 0,4 et 0,6 [29]. La quantité d'eau nécessaire à l'hydratation du ciment est de l'ordre de 20 à 25 % de la quantité de ciment en masse. Le reste de l'eau permet d'assurer la maniabilité du béton à l'état frais

### ***c. Rapport Gel / vide du ciment hydrate :***

Le rapport gel/vide est un indicateur essentiel de la qualité de la pâte de ciment hydratée. Il désigne le rapport entre le volume des produits d'hydratation formés (gel C-S-H principalement) et le volume total des vides présents dans la pâte. Une valeur élevée du rapport gel/vide traduit une densité importante de produits d'hydratation, ce qui signifie que l'espace poreux est bien rempli, contribuant ainsi à une meilleure résistance à la compression. Lorsque ce rapport est bas, cela indique une hydratation incomplète et une microstructure plus poreuse, donc mécaniquement plus faible.

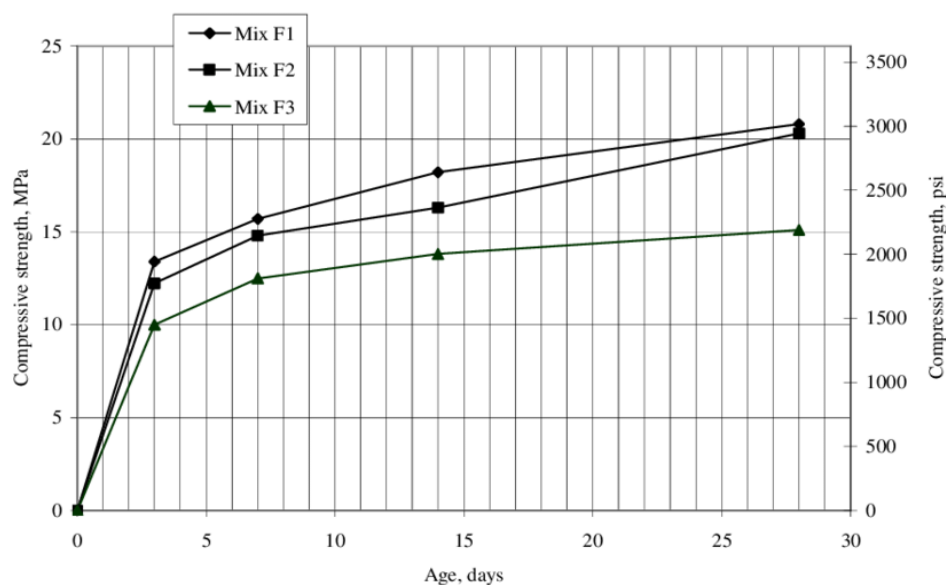
## **2.5. Influence du mûrissement sur les caractéristiques du béton :**

- ***Température :***

Les deux cas extrêmes qui se présentent sur chantier sont : le bétonnage par temps chaud et le bétonnage par temps froid.

**Le bétonnage par temps froid :**

Le froid est une cause de ralentissement des réactions d'hydratation du ciment, et même à arrêter la prise du béton si la température descend en dessous de 0°C, parce que l'eau de gâchage transforme en glace, et provoque une augmentation de volume qui crée une migration de l'eau dus à la formation de fissures internes. Pour cela, il faut permettre au béton d'atteindre une résistance suffisante, au minimum de 5 MPa, pour résister aux effets du gel. L'évolution des résistances en fonction du temps pour des essais réalisés par Bayfors est montrée sur la figure II.7. Selon cette figure, nous remarquons l'élévation de la température avec la résistance à court terme, mais cela n'est plus vrai à 28 jours [30]. Selon cette figure, nous constatant que lorsque la température s'élève la résistance à court terme s'élève mais cela n'est plus vrai à 28 jours.



**Figure 2-7 :** Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge du béton a différentes températures.

**Le bétonnage par temps chaud :**

Le degré d'hydratation évolue plus rapidement, les réactions d'hydratation du ciment sont accélérées, les temps de prise et de durcissement sont diminués. A température très élevée on a une augmentation de sa résistance mécanique pendant une durée très courte et une résistance à long terme faible (Fig.2.8)

## Chapitre 2 : Effet des conditions de mûrissement et de cure sur les caractéristiques du béton

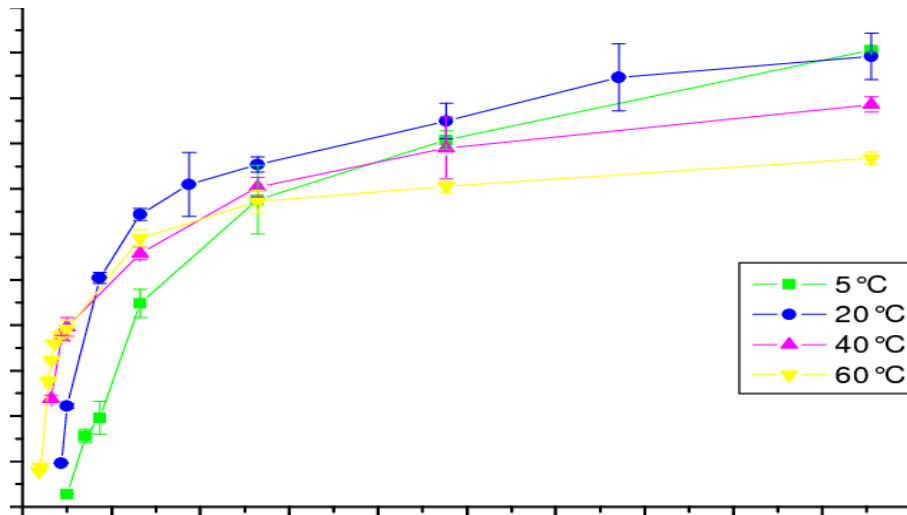


Figure 2-8 : Evolution des résistances de bétons conservés à des températures différentes

### Cure humide :

L'état hygrométrique du béton a une importance quant à l'évolution du volume des vides et par conséquent des résistances. L'hydratation du ciment se fait continuellement et s'accompagne d'un remplissage des capillaires par les amas d'hydrates, et la porosité de la pâte se voit ainsi réduite [30].

L'influence de la cure humide sur la résistance du béton est montrée d'une manière très claire par les données de la figure II.9. Cette dernière montre qu'après 180 jours et avec un rapport

E/C donné, la résistance du béton continuellement curé à l'humidité était 3 fois plus grande que celle du béton continuellement curé à l'air. Pour maintenir le processus d'hydratation et assurer une quantité satisfaisante du développement de la résistance, une période minimale de 7 jours pour la cure à l'humidité est généralement recommandée pour un béton à ciment portland normal [30]

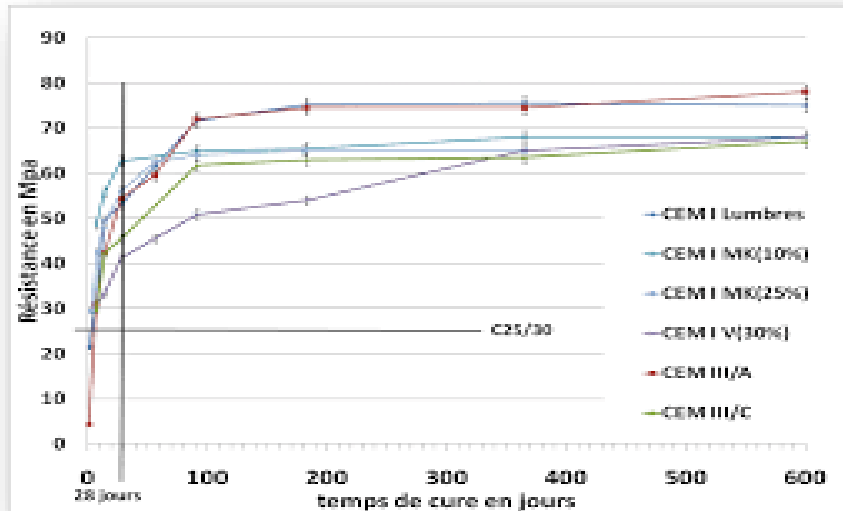


Figure 2-9 : Influence des conditions de cure sur la résistance.

La cure humide influence aussi le fluage et le retrait. Pour le degré du fluage d'un béton donné, les déformations différées sont plus importantes que l'humidité relative est faible. L'accroissement de l'humidité fait dilater le béton alors que la diminution le fait contracter

#### Age du béton :

Le béton est un matériau vieillissant, ce qui signifie que ses propriétés mécaniques (module d'élasticité, résistance) évoluent en fonction de l'avancement de la réaction d'hydratation du ciment. La réaction d'hydratation du ciment est une réaction très exothermique. Le durcissement du béton se fait alors avec des élévations de température qui peuvent atteindre 50°C dans les structures massives. De plus, l'hydratation du ciment est une réaction thermo-activée, ce qui signifie que la vitesse à laquelle se fait cette réaction chimique croît avec la température.

La résistance maximum d'un béton s'acquiert progressivement avec le temps, alors qu'au bout de 7 jours de prise, un béton acquies de 40 à 60% de sa résistance finale et de 60 à 80% au bout de 28 jours.

#### 2.6. Influence de la température sur le béton :

##### ❖ À hautes températures : [31]

Le froid ralentit les réactions d'hydratation du ciment, d'où une augmentation du temps de prise et de durcissement, allant même à arrêter la prise du béton si la température descend en dessous de 0°C, et transforme en glace l'eau de gâchage, et provoque une augmentation de volume qui crée une migration de l'eau dus a la formation de fissures internes Les dispositions à prendre consiste donc à permettre au

## Chapitre 2 : Effet des conditions de mûrissement et de cure sur les caractéristiques du béton

béton d'atteindre une résistance suffisante, au minimum de 5 MPa, pour résister aux effets du gel. [32]

❖ *À longues températures : [31]*

Le degré d'hydratation évolue plus rapidement, les réactions d'hydratation du ciment sont accélérées, les temps de prise et de durcissement sont diminués. A température très élevée on a une augmentation de sa résistance mécanique pendant une durée très courte et une résistance à long terme faible. Figure 2.10.

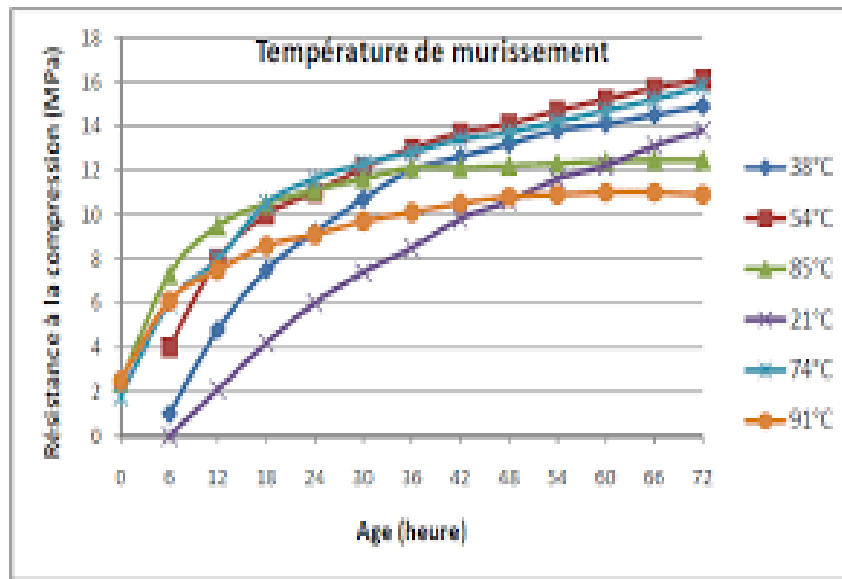


Figure 2-10 : Evolution des résistances de bétons conservés à des températures différentes.

### 2.7. Problèmes du béton pendant un climat chaud :

Les caractéristiques d'un climat chaud présentées précédemment sont responsables de l'élévation de la température du béton frais :

- Lors du malaxage, la température des constituants ou du malaxeur s'ils sont exposés au rayonnement solaire.
- A la mise en place, par exemple la durée de transport importante et de coffrage également exposés au rayonnement solaire

#### Ouvrabilité :

L'ouvrabilité est l'aptitude du béton à remplir au mieux les coffrages qui lui sont offerts tout en gardant son homogénéité. L'ouvrabilité est donc une propriété qui regroupe plusieurs caractéristiques du béton frais telles que la consistance, l'étalement, la capacité d'écoulement, le pompage, la mobilité, le compactage. Ces caractéristiques conditionnent aussi la résistance et la durabilité du béton durci.

## Chapitre 2 : Effet des conditions de mûrissement et de cure sur les caractéristiques du béton

L'ouvrabilité dépend de la quantité d'eau, la qualité des granulats et la grosseur des grains.

L'ouvrabilité du béton peut être évaluée par le cône d'Abrams, la table à choc, le Vebe et le maniabilimètre LCPC. Pour une composition donnée d'un béton, la maniabilité est caractérisée par la mesure de l'affaissement au cône d'Abrams [33].

L'optimisation d'une composition du béton permet d'ajuster le dosage des constituants et surtout le rapport E/C pour une consistance visée. Ce sont des essais d'étude effectués au laboratoire à 20°C. Lorsque la température augmente, elle conduit à une augmentation de la température du béton frais. Cette élévation de température conduit à une accélération du processus d'hydratation qui rend le béton plus ferme dès les premiers instants de sa confection.

L'augmentation de la température du béton est une cause de perte de maniabilité et chaque constituant y participe différemment en liaison avec son dosage et sa chaleur massique [33]. Par exemple, on retiendra, toute chose égale par ailleurs, que dans le domaine courant :

- Une augmentation de 10°C du ciment élève de 1°C la température du béton.
- Une augmentation de 10°C de l'eau élève de 2°C la température du béton.
- Une augmentation de 10°C des granulats élève de 7°C la température du béton

Avec l'accroissement de la température du béton, les propriétés physico-chimiques du matériau sont sensiblement modifiées

Mamillan et al. [33] ont montré qu'une augmentation de 11°C de la température du béton entraîne une réduction de l'affaissement de 25 mm et la quantité d'eau afin de compenser cette réduction augmente d'autant plus que la température du béton est plus élevée (Figure II.11). Aussi elle entraîne une augmentation de la demande en eau 6.5l/m<sup>3</sup> (Figure 2.12)

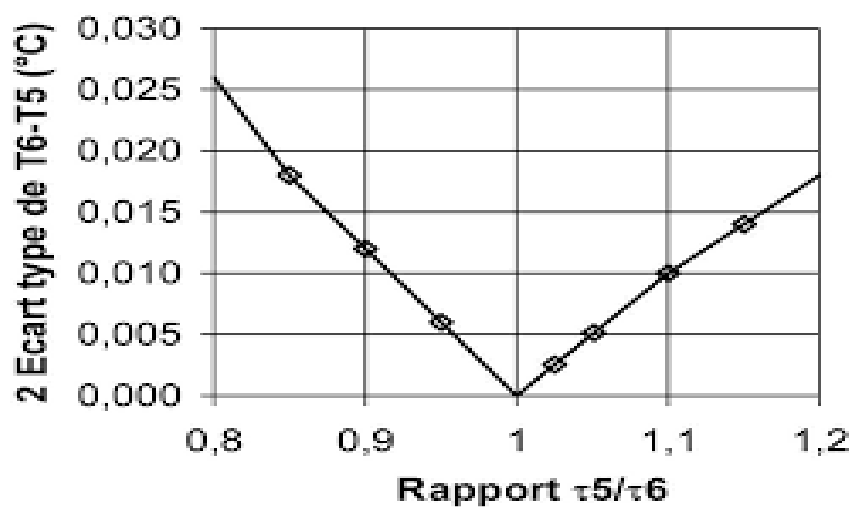


Figure 2-11 : Effet de la température du béton sur l'affaissement et sur la quantité d'eau nécessaire lorsque l'affaissement varie de 25 mm [34]

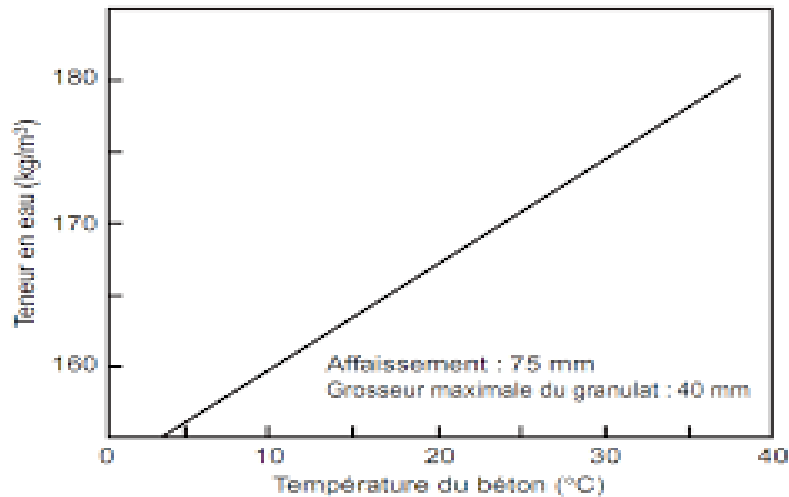
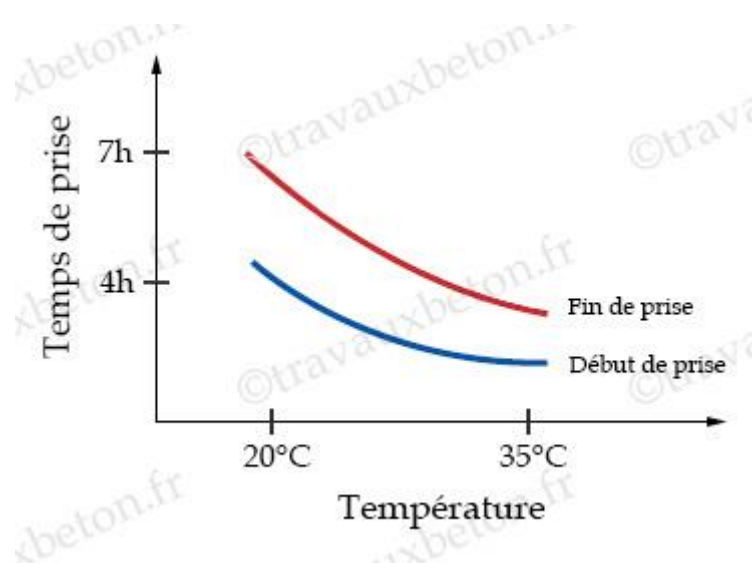


Figure 2-12 : Effet de la température du béton sur la quantité d'eau requise pour maintenir un affaissement de 75 mm [34].

Venuat rapporte qu'un complément de 7 à 10 l/m<sup>3</sup> en moyenne, est nécessaire pour maintenir la consistance, lorsque la température du béton frais s'élève de 10°C, quelle que soit la température, une quantité d'eau donnée correspond à un affaissement déterminé à la fin du malaxage, mais si le temps s'écoule entre la fin du malaxage et le moment où l'on mesure l'affaissement, la perte de ce dernier sera plus grande lorsque la température est élevée.

#### Temps de prise :

C'est le temps de cohésion de la pâte de ciment et le passage de l'état modulable à l'état rigide. Lors de ce passage on distingue deux repères : le temps de début de prise et le temps de fin de prise. Ces repères sont déterminés à l'aide de l'essai de Vicat [35]. Par temps chaud, l'élévation de la température du béton a pour effet de diminuer le temps de début et de fin de prise, et donc réduire la période pendant laquelle le béton peut être mis en œuvre. Donc les réactions chimiques entre le ciment et l'eau sont thermo-activées. Sa vitesse est plus rapide lorsque la température s'élève (Fig. 2.13)



## Chapitre 2 : Effet des conditions de mûrissement et de cure sur les caractéristiques du béton

Figure 2-13 : Influence de la température sur le début et la fin de prise d'un CPA (CEM I 32.5) [36].

Ahmadi [37] a observé que lorsque la température augmente, il y aura une diminution dans le temps initial de prise du béton. Avec l'augmentation de l'humidité sur le terrain, le temps de prise initial de béton augmente. L'augmentation de la vitesse d'air sur le terrain, implique une diminution du temps de prise initiale du béton (Fig. 2.14). L'auteur rapporte des effets similaires de temps de fin de prise à ceux de temps de prise initiale du béton (Fig.2.15)

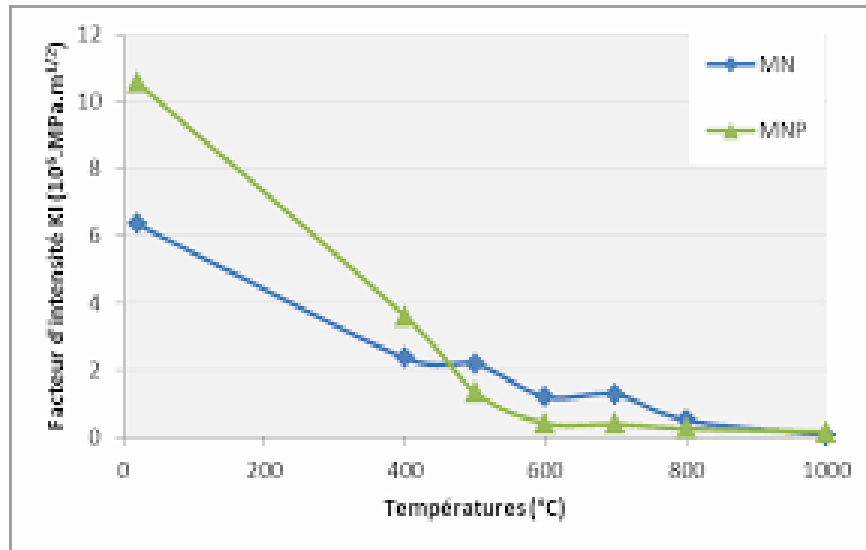


Figure 2-14 : Effet de la température sur le temps de début de prise [37]

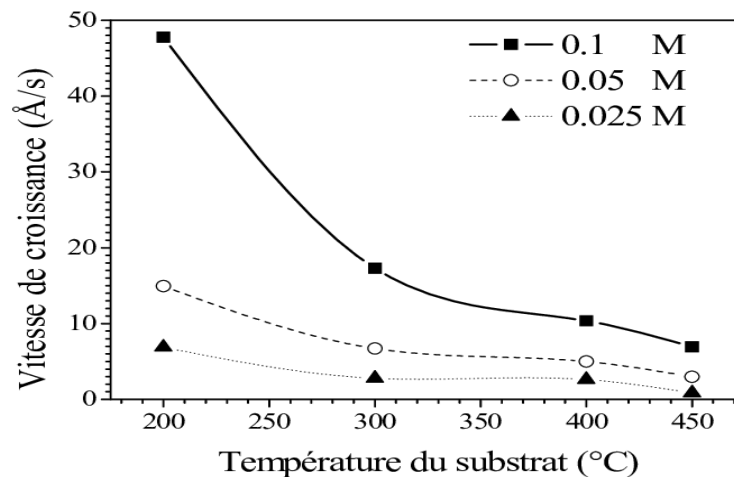





Figure 2-15 : Effet de la température sur le temps de fin de prise [37].

### Retrait plastique :

Le retrait du béton est défini comme une déformation volumique du matériau, au cours de son durcissement, induite par des phénomènes physicochimiques liés à

## ***Chapitre 2 : Effet des conditions de mûrissement et de cure sur les caractéristiques du béton***

l'hydratation de la pâte de ciment et au séchage. A l'état frais, le retrait plastique se manifeste suite à une évaporation trop rapide de l'eau du béton entraînant ainsi, quelques heures après le décoffrage, des fissures de retrait plastique. Dans la pratique, il est conseillé de ne pas dépasser une vitesse d'évaporation supérieure à 1kg/m<sup>2</sup>/h. elle est d'autant plus importante que :

-  ***La température ambiante est élevée,***
-  ***La température du béton augmente,***
-  ***L'air est sec [33].***

Le retrait plastique, appelé aussi retrait avant prise ou retrait capillaire, est une déformation qui se manifeste tant que le béton est plastique, à un moment où la pâte est encore déformable. Donc avant et/ou pendant la prise et sous l'effet d'une dessiccation ou d'une auto-dessiccation; une fissuration à la surface externe de l'ouvrage peut se former après le placement ou durant la finition. L'importance du retrait plastique est influencée par la vitesse de dessèchement qui dépend à son tour de la température de l'air et du béton, de l'humidité relative et de la vitesse du vent. Les fissures apparaissent dans le béton lorsque le retrait empêché dépasse sa capacité de déformation. Une grande partie des bétons est destinée aux applications horizontales comme les dalles, d'où un faible rapport volume sur surface et donc un retrait plastique élevé.

### **2.8. La cure du béton :**

L'humidité relative et les conditions climatiques défavorables lors de la mise en place d'un béton exposé peuvent contribuer à sa perte rapide d'eau. La cure du béton est un procédé lui permettant de maintenir des taux d'humidité et de température adéquats durant une période définie après coulage, dans le but de favoriser son bon durcissement. Essentielle, elle permet au béton de développer les propriétés requises telle que la durabilité, l'étanchéité, la résistance à la compression et à l'usure, la stabilité volumique [38].

#### **Méthode de cure (mûrissement) :**

##### **2.8.1.1. Vaporisation de produits de cure formant membrane :**

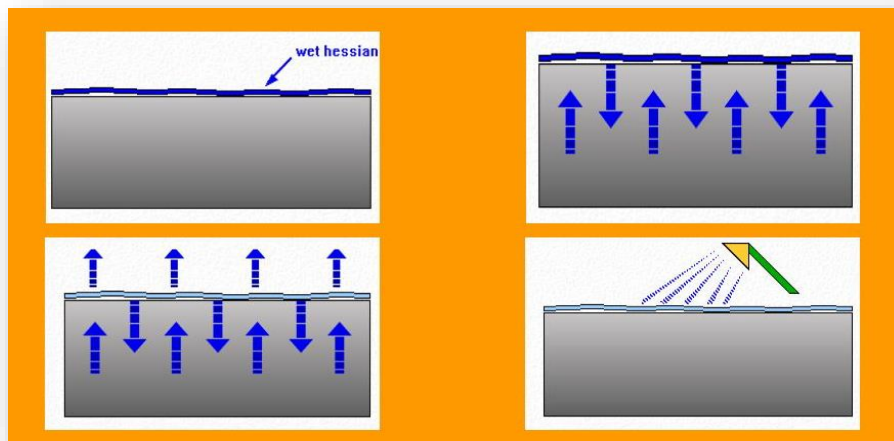
Les produits de cure formant membrane sont composés de cire, de résines, de caoutchouc chloré et de solvants très volatils et servent à réduire ou à retarder l'évaporation de l'eau du béton. Ils doivent être appliqués rapidement sur le béton frais ou sur les surfaces du béton après le décoffrage. De plus, ces produits doivent être vaporisés manuellement ou mécaniquement, en respectant le taux d'application recommandée par le fabricant, et être appliqués au moment opportun. Leur utilisation est à éviter pendant la période de ressuage du béton [38].

**2.8.1.2. L'arrosage et la vaporisation d'eau :**

L'arrosage continu ou la vaporisation sont des méthodes de cure souhaitables lorsque la température ambiante est à 10°C et que le taux d'humidité relative est très faible. Le béton doit demeurer humide, car l'alternance de cycles de mouillage/séchage altère la qualité de surface [38].

**2.8.1.3. L'application des toiles imbibées d'eau :**

Les toiles imbibées d'eau sont faites de coton, de jute, de géotextiles ou d'autres matières capables de retenir l'eau et sont fréquemment utilisées. Les toiles doivent être exemptes d'apprêt ou d'autres substances incompatibles avec le béton ou qui peuvent le décolorer. Elles doivent être maintenues continuellement humides durant la période de cure afin d'éviter d'absorber l'eau du béton. Une pellicule de polyéthylène recouvrant la toile diminue le nombre d'arrosage et peut-être utilisé lorsqu'un arrosage soutenu est optionnel pour refroidir le béton [38]



**Figure 2-16 :** Toile imbibée [38].

**2.8.1.4. Nappe d'eau et l'immersion :**

L'utilisation de nappes d'eau et l'immersion restent les méthodes les plus efficaces pour éviter les pertes d'humidité et maintenir le béton à une température uniforme. Les surfaces planes telles que les planchers peuvent être recouvertes d'une nappe d'eau. La différence de température entre l'eau et le béton doit être de moins 10°C afin d'éviter les fissures de retrait thermique [38].

**2.8.1.5. Pellicules de plastique ou de papiers imperméables :**

L'utilisation de pellicules de plastique ou de papiers imperméables peut s'avérer suffisante sur des surfaces horizontales ou sur des bétons structuraux ayant des formes simples. Ces méthodes diminuent le besoin d'apports d'eau continue et assurent une

## *Chapitre 2 : Effet des conditions de mûrissement et de cure sur les caractéristiques du béton*

hydratation adéquate du ciment en empêchant l'eau de s'évaporer. Elles sont à éviter lorsque les surfaces apparentes du béton sont importantes, ainsi que par temps chaud à cause de l'effet de serre. Si le papier imperméable est abimé pendant la période de protection, il faut réparer et sceller la partie endommagée [38].

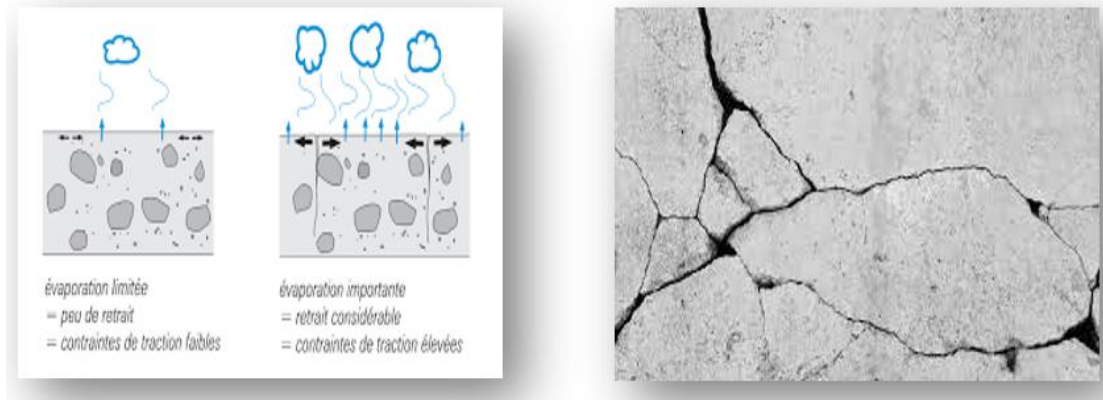


Figure 2-17 : Papiers imperméables [38]

### **Importance et conséquences de la cure :**

La cure du béton est importante au début de sa prise et de son durcissement. L'eau peut quitter le béton fraîchement coulé par évaporation sur les surfaces non protégées.

- ✚** *L'évaporation empêche la réaction chimique de prise du béton de se faire correctement mettant en cause la résistance du béton. En effet, s'il y a moins d'eau que celle nécessaire à l'hydratation, il y aura moins de liaisons chimiques donc moins de force de cohésion entre les composés [39].*
  
- ✚** *L'évaporation de l'eau provoque l'augmentation de la porosité. L'eau en partant crée des vides qui seront des espaces libres pour la venue des agents agressifs (chlorures, carbonates, les sulfates, les alcalins, les acides) et un logement pour l'eau gelée, ... Cette porosité aurait donc pour conséquence une diminution de la durabilité du béton [39].*
  
- ✚** *Des fissures peuvent également apparaître. L'eau de surface, en s'en allant à tendance à entraîner la matière avec elle. On a alors création de fissures, qui ont le même effet que les vides sur la durabilité et la résistance [39].*



**Figure 2-18** : Fissuration due au départ d'eau [39].

### **Influence de la cure sur la résistance :**

Les conditions de conservation (cure) peuvent aussi influencer sur la résistance. Il faut distinguer ici deux aspects différents du problème : l'absence de cure au jeune âge et l'interruption de la cure avant l'essai de compression. Au jeune âge, l'absence de cure provoque un ralentissement ou un arrêt précoce de l'hydratation et donc conduit à des résistances ultimes plus faibles de 10% à 25% plus faible selon la durée d'exposition à une humidité relative à 50% [40].

Des travaux menés par [41] ont montré que l'effet de la température de mûrissement sur la résistance à la compression exprime en pourcentage de diminution, est plus petit dans le cas de BHP que dans le cas du béton usuel. La figure II.19 montre que la résistance à la compression à 28 jours diminue de 11 %, 15 % et 23 % lorsque la température augmente de 20 à 50, 65 et 80 °C respectivement pour le béton usuel (Mix N3). Tandis que, elle est de 2 %, 6 % et 7 % dans le cas de béton léger à haute performance (HSLWC). [41] relie cela, au fait que, les grains de ciment sont tellement proches de façon que la quantité des hydrates formes dans la période initiale de mûrissement, sera suffisante pour remplir tous les espaces inters granulaires. Par conséquent, la diminution du taux d'hydratation dans la période qui suit, cause par l'augmentation de la température de mûrissement, n'affecte pas la résistance à long terme Toutefois, l'influence de la température de mûrissement sur la résistance à la compression à long terme des BHP dépend du type de liant [42].

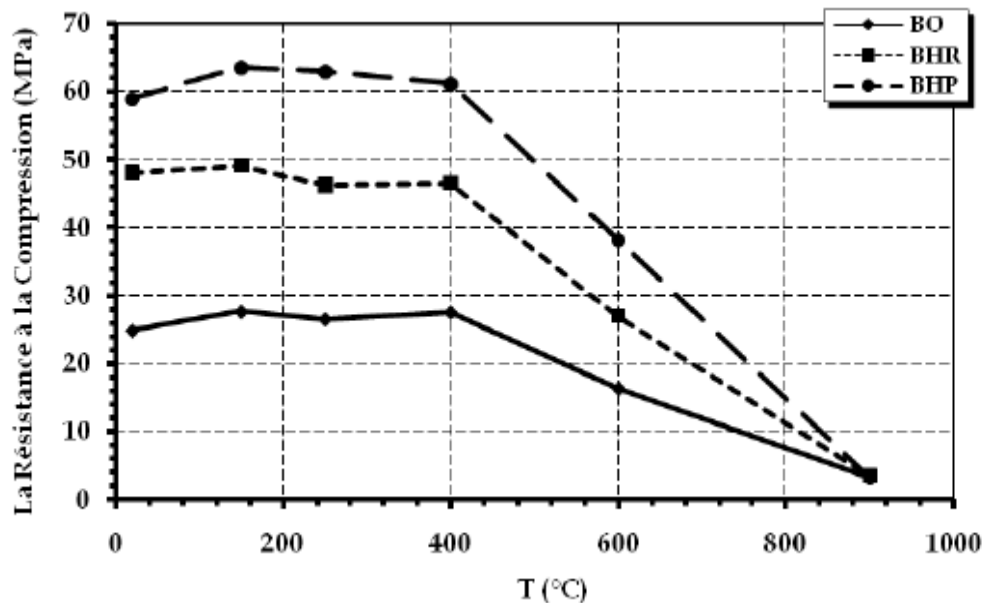


Figure 2-19 : Effet de la température de mûrissement sur la résistance à la compression du béton (%) [41].

Les auteurs ont utilisé deux BHP avec le même E/L de 0,3, le premier contient seulement du ciment portland et le deuxième contient de plus de ciment de la fumée de silice. Trois types de cure ont été adoptés. Le premier mode de cure (B23) se fait dans un réservoir d'eau à 23 °C et est équivalent au mûrissement standard. Le deuxième (S23) se fait en couvrant les échantillons par une couche plastique collante à 23 °C qui peut être analogue à la partie du béton proche de la surface du béton in situ. Le troisième mode de cure (TMC) se fait dans un réservoir d'eau dont la température est réglée de façon à avoir le même scénario que celle à l'intérieur d'un poteau et qui peut atteindre une température maximum de 70 °C après quelques heures.

La figure 2.20 montre que la résistance à la compression du béton avec ciment portland est plus grande à jeune âge dans le cas de mûrissement (TMC) que dans le cas du (B23). Le développement de la résistance des cylindres mûris à (TMC) continue jusqu'à 1 an mais avec un taux plus lent que celui des cylindres mûris à (B23). De plus, à 1 an la résistance à la compression des cylindres mûris à (B23) est plus grande que celle des mélanges mûris à (TMC)

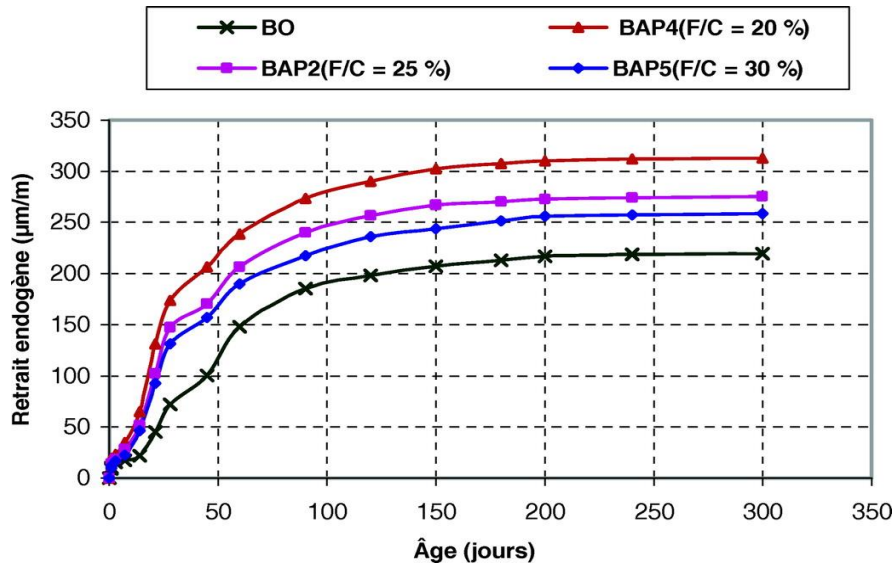


Figure 2-20 : Développement de la résistance à la compression d'un béton avec ciment portland sous différents modes de cure

La figure 2.21 montre que la résistance à la compression du béton avec fumée de silice mûries à (TMC) est inférieure significativement à celui-ci mûrie à (B23). De plus, contrairement au cas du béton avec ciment portland, la résistance du béton avec fumée de silice à jeune âge est plus grande dans le cas du mûrissement (B23) que dans le cas de mûrissement (TMC). De même, la résistance à long terme pour un mûrissement (TMC) est plus petite que pour un mûrissement (S23).

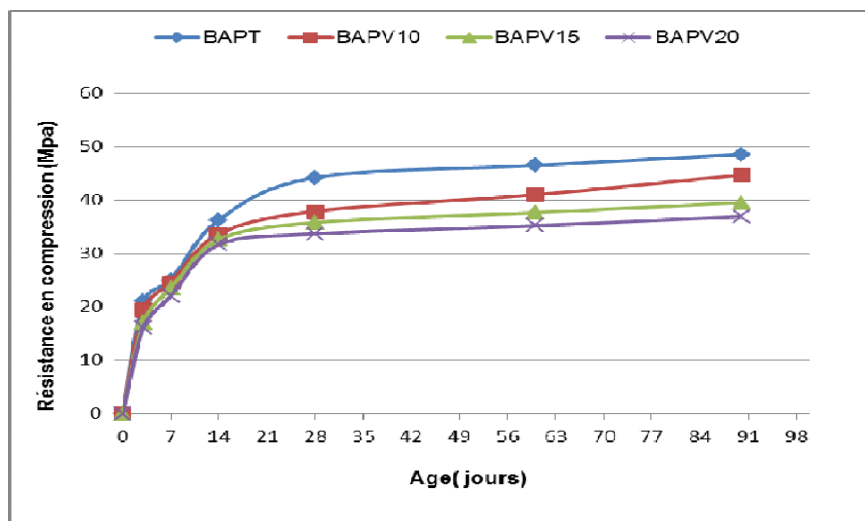


Figure 2-21 : Développement de la résistance à la compression du BHP avec la fumée de silice sous différents modes de cure Mak et Torii [1995]

Ces études discutent les facteurs influençant sur le développement de la résistance à la compression à court et à long terme, tout en analysant l'effet du type de liant (ajouts cimentaires), E/L, de la température et même les différents modes de cure.

**2.9. Influence des additions sur les caractéristiques du béton :**

**Définition :**

Elles peuvent être avantageusement utilisées en remplacement des ciments, de manière à augmenter les performances des BHP. De façon générale, ce sont des poudres plus ou moins réactives de finesse équivalente ou supérieure à celles des ciments courants. On distingue : les cendres volantes (silico-alumineuses), les fillers calcaires, les fillers siliceux, le laitier granulé broyé, les fumées de silice. Leur introduction permet de moduler, à même niveau de résistance mécanique :

- *Le retrait du BHP et sensibilité à la fissuration,*
- *La durabilité du BHP,*
- *La résistance au jeune âge,*
- *La rhéologie,*
- *L'aspect des parements, l'élévation de température. [43]*

L'incorporation des additions minérales est maintenant une technique importante en améliorant les propriétés du béton telle que la fluidité, la résistance, la durabilité, etc. ces additions minérales affectent de manière significative la rhéologie des matériaux cimentaires à l'état frais, qui est directement relié avec le développement de la résistance, la durabilité des matériaux durcis. Néanmoins, pour profiter pleinement de ces avantages et ainsi choisir la meilleure solution permettant d'optimiser la formulation, il est nécessaire de connaître les caractéristiques de ces nouveaux composants (additions minérales et adjuvants) et leurs actions sur les propriétés des bétons. [44]

**Fumée de silice :**

La fumée de silice est un produit minéral amorphe obtenu essentiellement lors de la fabrication du silicium et de ses alliages. Le silicium est obtenu par réduction du quartz en présence de carbone à 2 000 °C dans des fours à arc électrique. Les fumées contiennent du monoxyde gazeux (SiO) qui s'oxyde et se condense en particules vitrifiées amorphes extrêmement fines. Ces particules sont lisses et sphériques (100 000 billes de fumées recouvrent entièrement un grain de ciment). Leur couleur est le plus souvent gris clair. [45]

**Incorporation de fumée de silice :**

Dans les bétons conduits à des améliorations remarquables des caractéristiques rhéologiques et mécaniques des bétons. Pour les bétons frais, la fumée de silice complète le fuseau granulaire et supprime les tendances au ressuage ou à la ségrégation tout en réduisant les chaleurs d'hydratation. Pour les bétons durcis, la finesse de la fumée de silice permet de créer une microstructure très dense qui conduit à des bétons extrêmement compacts, à caractéristiques mécaniques élevées en réduisant les teneurs en eau grâce à l'adjuvantation. Ces bétons ont ainsi une résistance nettement renforcée

## ***Chapitre 2 : Effet des conditions de mûrissement et de cure sur les caractéristiques du béton***

vis-à-vis des agents ou des phénomènes agressifs : attaques chimiques, acides, sulfates, abrasion gel/dégel, en réduisant significativement la porosité et la perméabilité, la carbonatation, les phénomènes d'alcali-réaction et de réaction sulfatique interne. [46]

### **Obtention d'un BHP à base de la fumée de silice :**

L'obtention d'un béton à hautes performances ne nécessite pas forcément l'utilisation d'une fumée de silice ; puisque, on a pu fabriquer un béton dont sa résistance a atteint 60 MPa sans l'utilisation de fumée de silice. Les bétons à hautes performances de classe I et II (résistance en compression comprise entre 50 et 100 MPa) peuvent être fabriqués sans l'incorporation de la fumée de silice dans le mélange, mais pour des classes supérieures III, IV et V (résistance en compression dépassant 100 MPa) l'utilisation de la fumée de silice s'avère indispensable.

L'utilisation des fumées de silice dans le but d'obtenir des résistances élevées doit donc se faire en les associant avec des CPA-CEM I sans dépasser le rapport FS/C = 18% ; même si l'effet granulaire de la fumée se fait sentir jusqu'à des valeurs de FS/C de l'ordre de 33%. Au-delà de ce pourcentage, les avantages espérés risquent d'être moindres voir même des difficultés de mise en œuvre. P-C. AÏTCIN propose un dosage optimal compris entre 6 et 10%. Il faut signaler que l'utilisation de la fumée de silice nécessite obligatoirement l'ajout d'un superplastifiant, qui aura comme fonction la défloculation des grains de ciment et des particules de la fumée de silice. Sans superplastifiant, l'ajout de la fumée de silice au béton conduit pour une même maniabilité à une augmentation de la demande en eau. Car les ions de calcium  $Ca^{+2}$ , libérés lors de l'hydratation du ciment, ancrent les particules de fumée de silice entre elles et forment une structure rigide s'apparentant à un gel ; cette structure diminue fortement la maniabilité du béton. [47]

### **2.10. Influence des adjuvants sur les caractéristiques du béton:**

Les adjuvants sont des produits chimiques incorporés en faibles quantités au béton frais afin d'en améliorer certaines propriétés. Ils représentent entre 1 et 5 % du poids du ciment. Leur rôle et leur efficacité dépendent de la nature du produit chimique et de l'homogénéité de leur répartition dans la masse du béton frais [48, 49].

#### ***a) Mode d'action :***

Leur action est différente d'un adjuvant à un autre en contact des grains de ciment. D'une manière générale, les adjuvants enrobent le grain de ciment pendant l'hydratation pour augmenter une charge négative sur la surface de la particule de ciment. Nous détaillerons plus bas, certaines réactions des différents adjuvants avec le ciment.

#### ***b) Classification des adjuvants :***

Les adjuvants sont utilisés depuis très longtemps mais leur développement réel et la multiplication de leur utilisation n'ont commencé que depuis 1960 [50]. Leur qualité et leur constance s'améliorent sans cesse. Selon des recherches statistiques [50], la majorité des bétons utilisés en Amérique du nord contiennent au moins un adjuvant. Au

## ***Chapitre 2 : Effet des conditions de mûrissement et de cure sur les caractéristiques du béton***

Japon comme en Australie, 80 % des bétons confectionnés contiennent des adjuvants, tandis qu'en Allemagne cette valeur est de 60 %. Les adjuvants peuvent être organiques ou inorganiques selon leur composition chimique, mais leur caractère chimique, distinct de celui des autres minéraux utilisés dans la fabrication du béton, est essentiel. Ainsi, dans la nomenclature Américaine on les appelle adjuvants chimiques, mais ici cette qualification est superflue, car les produits minéraux incorporés dans le béton, dont la teneur est souvent supérieure à 5% de la masse du ciment, sont appelés liants ou ajouts.

On peut classer les adjuvants selon leur fonction dans les catégories suivantes :

- ***Plastifiants*** : Les plastifiants (ou fluidifiants) sont les adjuvants les plus utilisés dans la production du béton. Ils ont la propriété de rendre plus facile la maniabilité du béton, et donc, à maniabilité égale, de réduire fortement la quantité d'eau de gâchage et d'augmenter donc la résistance du béton (en diminuent le rapport E/C). Un plastifiant réduit le rapport eau/ciment de l'ordre du 5% ; lorsqu'il est nécessaire d'obtenir des réductions du rapport E/C de l'ordre de 20 - 40% on parle d'adjuvant super-plastifiant [51].
- ***Superplastifiant*** : sont des adjuvants à haut pouvoir de réduction d'eau. Ils ont pour rôle de maintenir une maniabilité donnée tout en diminuant la quantité d'eau dans le béton. Ils permettent ainsi d'obtenir un béton plus résistant en raison de la réduction de l'eau. A titre indicatif, les superplastifiants permettent de réduire la teneur en eau de 25 à 35% tout en gardant une même maniabilité [50].

L'action d'un superplastifiant passe nécessairement par son adsorption sur les particules de ciment. En se fixant sur les grains de ciment, elle modifie la nature des charges électriques. Les grains de ciment ont alors tendance à s'éloigner les uns des autres du fait qu'ils ont tous la même charge et s'entourent d'un film d'eau très mince. Ainsi on obtient un grain de fluidité, puisque les grains de ciment sont mieux dispersés. L'eau existante sert alors de fluidifier le béton. Dans certains cas, l'ajout du superplastifiant est directement additionné dans la toupie du camion afin d'éviter une perte de fluidité pendant le trajet

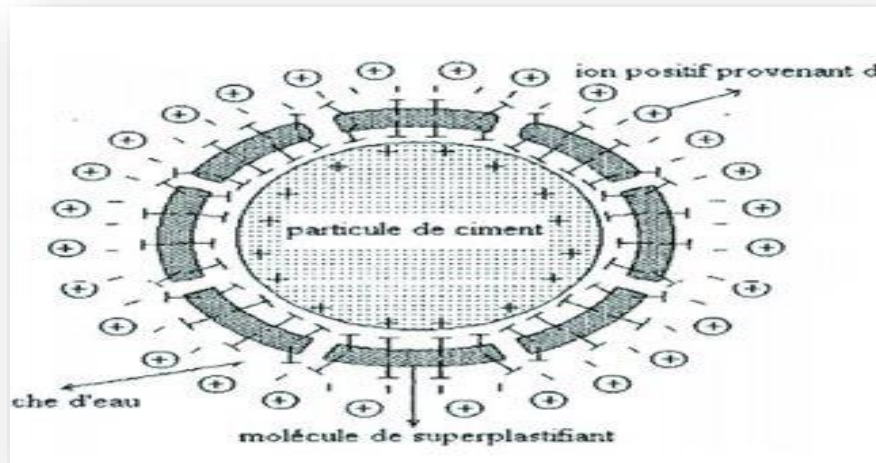


Figure 2-22: Mode d'action d'une molécule de superplastifiant

Le superplastifiant est ajouté dans le béton puis malaxé pendant 3 minutes dans la toupie à vitesse maximum. Il suffit de reconnaître que les adjuvants en général et les superplastifiants en particulier, s'ils sont bien utilisés, sont des constituants essentiels pour des bétons durables. Il est possible enfin de confectionner des bétons imperméables et résistants aux agents chimiques grâce aux adjuvants et un rapport E/C très bas ( $\leq 0.35$ ). Bien sûr, il ne faut pas aussi négliger le temps de mûrissement d'un béton. Cette étape est aussi importante que la confection du béton lui-même. Nous verrons plus loin les moyens et les méthodes utilisés pour la protection des bétons frais.

➤ **Retardateurs de prise** : Les retardateurs de prise sont des molécules organiques qui empêchent la nucléation du CSH [51]. Les adjuvants retardateurs sont souvent des mélanges de :

- 1) Lignosulfonates : Ce sont des sous-produits de la cellulose obtenus par un procédé au bisulfite dans le traitement du bois. Leur taux élevé en sucre (xylose) est la raison de l'effet retardateur.
- 2) Gluconate de sodium : retardateur très actif  $\text{CH}_2\text{OH}(\text{CHOH})_4\text{COONa}$
- 3) Gluconate de Calcium
- 4) Acide citrique
- 5) Le borax
- 6) Les sucres (glucose, saccharose...etc).

### Mode d'action

Les retardateurs peuvent agir en diminuant la vitesse d'hydratation de certains constituants anhydrides des ciments. En se précipitant autour des grains de ciment ou en formant avec la chaux des précipités enrobant certaines parties des grains anhydrides

## ***Chapitre 2 : Effet des conditions de mûrissement et de cure sur les caractéristiques du béton***

(CaSO<sub>4</sub>). Il y a donc une formation d'une enveloppe plus ou moins imperméable et d'épaisseur variable.

Le retardateur va dépendre alors :

- ✓ De l'épaisseur de l'enveloppe
- ✓ De son imperméabilité
- ✓ De sa composition (de l'enveloppe créée par l'adjuvant)
- ✓ Du pH du milieu

L'action va dépendre surtout de la teneur en C3A et C3S, des alcalins et des sulfates dans le ciment.

- ***Accélérateurs de prise*** : C'est un adjuvant dont la fonction principale est d'accélérer le début et la fin de prise du ciment. Mais en contrepartie, l'accélération recherchée peut entraîner une résistance mécanique moins élevée que le témoin.

Les adjuvants chimiques sont des produits solubles dans l'eau et le plus souvent d'origine minérale : acide ou base forte et leurs sels.

Ils agissent en modifiant sélectivement la solubilité et la vitesse d'hydratation des liants constituant anhydrides. Certains accélérateurs sont plus efficaces avec un ciment portland qu'avec un ciment en forte teneur en constituants secondaires (CPJ).

- ***Entraîneurs d'air*** : L'air entraîné dans le béton a été remarqué accidentellement pour la première fois aux USA vers les années 1938. Ces adjuvants, qui confèrent au béton durci la capacité de résister aux effets de gels et de dégels successifs en favorisant la formation de microbulles d'air réparties de façon homogène [52].

Les bulles d'air doivent être nombreuses, suffisamment petites (60 et 100 $\mu$ ) et réparties uniformément dans la masse, pour pouvoir, plus tard, servir de « barrage » dans le réseau des canalicules. Elles pourront éventuellement recueillir l'eau et la glace remontant par capillarité. L'air occlus permet aussi :

- a) D'améliorer la maniabilité du béton ;
- b) De diminuer le ressuage.

Mais il est important de souligner que l'addition d'un entraîneur d'air dans le béton, diminue :

- Les résistances mécaniques de béton.
- Le pourcentage d'air occlus dans le béton ne doit pas dépasser 6%.
- L'adjuvant est introduit directement dans la bétonnière pendant le malaxage du béton.

L'influence des adjuvants peut varier sensiblement en fonction de la nature et de la composition du ciment ; des problèmes de compatibilité peuvent apparaître entre adjuvants et ciments [53].

**2.11. Influence de la cure sur la durabilité des bétons :**

La cure a une forte influence sur les propriétés du béton durci. Les surfaces exposées des dalles sont particulièrement sensibles puisque c'est la qualité des premiers millimètres du béton qui protège les dalles des différentes agressions. À titre d'exemple la résistance au gel/dégel et les propriétés mécaniques du béton peuvent diminuer de façon importante lorsque la cure est inadéquate [BEN KHADDA, 2006].

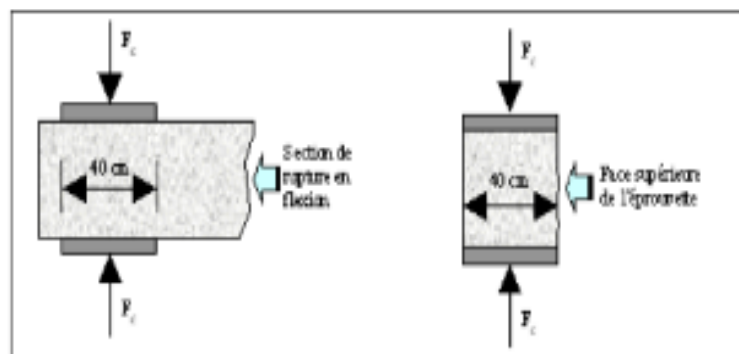
**2.12. Moyens de caractérisation des caractéristiques du béton**

**Résistance à la compression :**

La résistance en compression est le paramètre de base pour le béton, elle définit souvent une classe de résistance dont sont censées découler beaucoup d'autres propriétés. Le comportement de béton en compression est traduit principalement par une relation contrainte-déformation

On peut distinguer, à déformation croissante, trois phases de comportement [54] :

- Une phase de comportement analogue à celui d'un matériau homogène et élastique, se traduisant par une relation à peu près linéaire entre la contrainte et la déformation
- La phase de développement de la micro fissuration qui entraîne une incurvation progressive de la courbe jusqu'à l'atteinte du maximum de contrainte ;
- La phase de développement des surfaces de fracture et d'une fissuration plus ou moins généralisée, c'est-à-dire la propagation progressive de la rupture [54].



**Figure 2-23:** Dispositif de rupture en compression

**2.13. Porosité accessible à l'eau :**

La porosité accessible à l'eau représente le volume de pores dans le béton qui peut être envahi par l'eau. Elle est un indicateur clé de la durabilité du béton, car elle influence la facilité avec laquelle des agents agressifs (comme les sels de déverglaçage, les ions chlorures ou le dioxyde de carbone) peuvent pénétrer et dégrader le béton au

## Chapitre 2 : Effet des conditions de mûrissement et de cure sur les caractéristiques du béton

fil du temps. Cette porosité est généralement mesurée à l'aide de la méthode de pesée hydrostatique, qui consiste à mesurer la masse d'une éprouvette saturée et sèche, puis à calculer le volume de pores accessibles à l'eau. Un béton à faible porosité est considéré comme plus durable, car il est moins susceptible à la pénétration de substances agressives et à l'apparition de phénomènes de corrosion des armatures

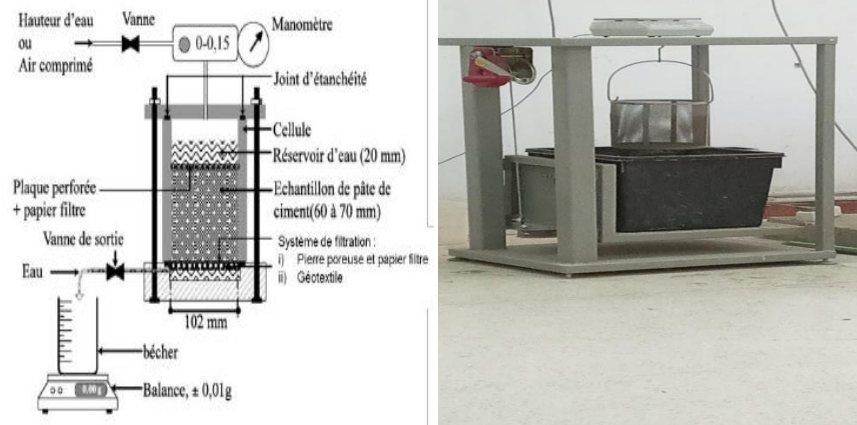


Figure 2-24: Essais de porosité accessible à l'eau

### Absorption d'eau dans le béton :

L'absorption d'eau par capillarité dans le béton est une propriété importante, notamment dans les environnements où le béton est susceptible d'être exposé à des cycles d'humidité, comme dans les structures exposées aux intempéries ou à des conditions de gel/dégel. L'absorption d'eau est mesurée en immergeant une éprouvette de béton séchée et en suivant son augmentation de poids au fur et à mesure qu'elle absorbe l'eau. Ce paramètre permet de déterminer la capacité du béton à retenir l'eau et peut aussi être indicatif de sa compacité et de sa résistance à la pénétration de fluides agressifs. Un béton à forte absorption d'eau est généralement plus vulnérable à la dégradation à long terme, notamment en raison de la corrosion des armatures et de la formation de fissures dues au gel.

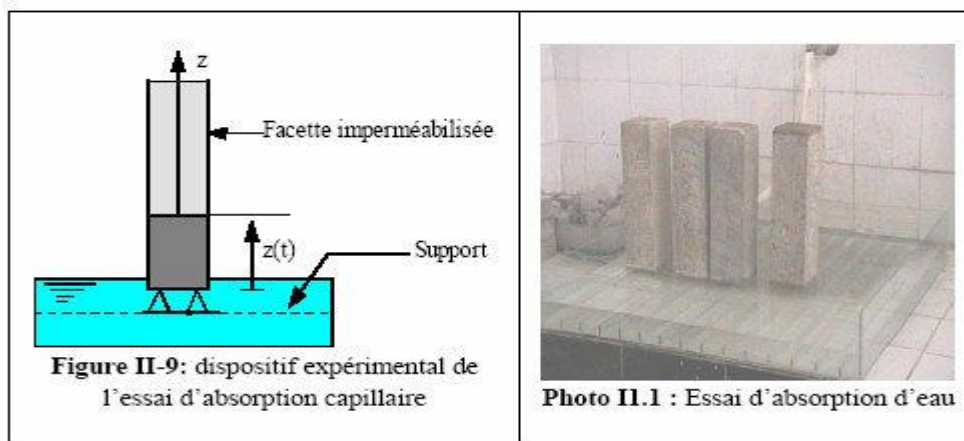


Figure II-9: dispositif expérimental de l'essai d'absorption capillaire

Photo II.1 : Essai d'absorption d'eau

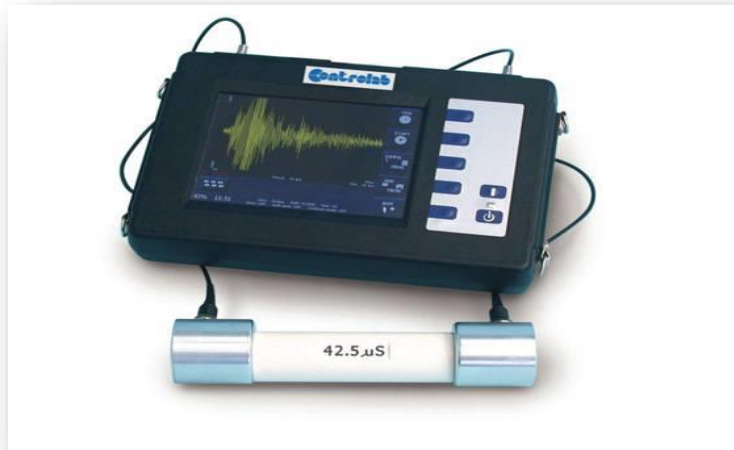
**Figure 2-25:** Absorption d'eau

**Essais de séchage / mouillage :**

Les essais de séchage/mouillage sont utilisés pour simuler les conditions réelles de service des ouvrages en béton soumis à des cycles d'humidité et de sécheresse. Ces tests consistent à exposer le béton à des cycles répétés de séchage (à température contrôlée) et de mouillage (par immersion ou pulvérisation d'eau). Ces variations de teneur en eau créent des tensions internes dans la matrice du béton, pouvant conduire à l'apparition de fissures et à une dégradation progressive du matériau. Ce type de test est crucial pour évaluer la résistance du béton aux phénomènes de dilatation et de contraction qui peuvent être induits par des conditions climatiques variables. Les structures exposées à de tels cycles, comme les dalles de sols extérieures ou les fondations en contact avec le sol, peuvent souffrir de dégradations importantes si le béton n'est pas conçu pour résister à ces conditions.

**Essais ultrasoniques :**

Les essais ultrasoniques sont des tests non destructifs qui permettent de caractériser la compacité et l'homogénéité du béton. Cette méthode repose sur la propagation d'une onde ultrasonore à travers le béton. En mesurant la vitesse de propagation de cette onde, on peut obtenir des informations sur la densité, la présence de fissures ou de vides, ainsi que sur la résistance à la compression. Une onde ultrasonore se propage plus rapidement à travers un matériau dense et homogène, et plus lentement dans un matériau poreux ou fissuré. Cette méthode est utilisée tant en laboratoire qu'en in situ pour évaluer rapidement la qualité du béton et détecter d'éventuelles anomalies, sans endommager la structure. En outre, elle permet de suivre le processus de durcissement du béton au fil du temps et de vérifier l'intégrité des ouvrages pendant leur service.



**Figure 2-26 :** Essais ultrasoniques

### ***Conclusion***

Les conditions de mûrissement et de cure du béton influencent directement ses caractéristiques mécaniques et sa durabilité. La température, l'humidité et la durée de la cure sont des facteurs déterminants dans le processus d'hydratation du ciment, essentiel à la solidification du béton. Une cure adéquate, qui maintient une humidité suffisante, permet d'éviter la déshydratation prématurée et la fissuration, tout en favorisant l'obtention d'une résistance optimale. La cure doit être effectuée dans un environnement contrôlé pour éviter des variations de température qui peuvent compromettre la qualité du béton. En effet, une cure inappropriée ou insuffisante peut conduire à des défauts comme une faible résistance à la compression, une porosité accrue et une vulnérabilité aux agressions extérieures, notamment la pénétration de chlorures et les cycles de gel/dégel. Ainsi, une gestion rigoureuse des conditions de mûrissement et de cure est essentielle pour garantir la performance à long terme du béton dans les ouvrages de génie civil.

*Chapitre 03 :*

*Recyclage,*

*préparation des*

*déchets et utilisation*

*dans le béton*

## ***3. Recyclage, préparation des déchets et utilisation dans le béton***

### ***Introduction***

La gestion des déchets représente l'un des défis environnementaux majeurs contemporains, notamment dans les pays en développement qui souffrent d'un manque d'infrastructures adéquates de collecte et de traitement. En Algérie, le volume des déchets urbains et industriels connaît une croissance continue, accompagnée d'un recours excessif à l'enfouissement sauvage, ce qui aggrave les impacts environnementaux et sanitaires. Pour remédier à cette situation, le Programme national de gestion des déchets ménagers (PROGDEME) a été lancé en 2001, marquant une transition vers une culture de tri et de recyclage. Dans ce cadre, la valorisation des déchets recyclés, tels que les résidus de briques, dans la fabrication du béton, se présente comme une solution à la fois écologique et économique, s'inscrivant dans une logique de développement durable, à condition de respecter les normes techniques et de sensibiliser la société à l'importance de cette démarche.

### ***3.1. Généralités sur les déchets :***

#### **Définition des déchets :**

Les déchets peuvent être traités de diverses façons selon leur nature, et sont définis comme « tout résidu provenant de l'activité de production, de transformation ou d'utilisation, ou plus largement tout bien meuble abandonné, susceptible de nuire aux sols, à la flore, à la faune, de dégrader les paysages ou les sites, de polluer l'air ou l'eau, ou encore de produire des nuisances telles que le bruit ou les odeurs ». Cette diversité de caractéristiques influence les approches que l'on peut adopter pour les gérer. De manière générale, ils représentent un danger tant pour la santé humaine que pour l'environnement.[55]

La définition des déchets d'un point de vue économique et juridique est la suivante :

#### ***3.1.1.1. D'un point de vue économique :***

Un déchet est tout élément dont la valeur économique est nulle ou négative pour son détenteur. Pour s'en débarrasser, celui-ci doit soit payer un service, soit s'en charger lui-même. Toutefois, les déchets sont de plus en plus perçus comme une ressource

potentielle. Grâce aux avancées technologiques, il devient possible d'en extraire une nouvelle valeur apte à réintégrer le circuit économique.

**3.1.1.2. Du point de vue juridique :**

La définition juridique du déchet distingue la perception subjective de la notion objective. Un bien demeure la propriété de son détenteur tant qu'il est conservé à sa place prévue. En revanche, lorsqu'il est abandonné sur la voie publique, il devient un bien appartenant à la collectivité, traduisant la volonté claire de son propriétaire de s'en défaire. Selon la définition objective, un déchet est tout objet qui, en raison de ses caractéristiques, doit être réglementé afin de protéger la santé publique et l'environnement, indépendamment de la volonté ou de la perception de sa valeur par le propriétaire. Cela soulève une question cruciale : « Que faire des déchets ? », d'autant plus que leur volume ne cesse de croître. Les pays à forte consommation ont été les premiers confrontés à cette problématique, car l'accumulation massive de déchets entraînait de graves nuisances : pollutions multiples et risques pour la santé publique. [56]

**Différents types de déchets :**

➤ **Déchets ultimes (DU) :**

La loi du 13 juillet 1992 introduit la notion de déchet ultime et le définit comme : « Un déchet, résultant ou non du traitement d'autres déchets, qui n'est plus susceptible d'être traité dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de la part valorisable ou par réduction de son caractère polluant ou dangereux. »

Les déchets ultimes issus des incinérateurs d'ordures ménagères, appelés mâchefers, peuvent, après traitement, être transformés en granulats et utilisés comme matériaux pour la construction de fondations routières. .[57]

➤ **Déchets ménagers et assimilés :**

Ce terme regroupe l'ensemble des déchets issus de notre vie quotidienne, tels que : les emballages, les restes alimentaires, les appareils électroménagers usagés, les vieux meubles, les déchets verts, les vêtements usagés, etc.

➤ **Déchets inertes (DI) :**

Les déchets inertes proviennent des travaux d'extraction, de construction, de démolition ou de rénovation. Ils ne contiennent ni substances dangereuses ni éléments nocifs, ne sont pas biodégradables et ne réagissent pas de manière à causer une pollution ou un danger pour l'environnement ou la santé humaine.

### Chapitre 3 : Recyclage, préparation des déchets et utilisation dans le béton

Ils sont admissibles dans les installations de stockage et comprennent notamment : le béton, les briques, les tuiles, les céramiques, le verre, la terre, les enrobés bitumineux et les déchets minéraux de chantier. .[58]



Figure 3-1 : Déchets inertes

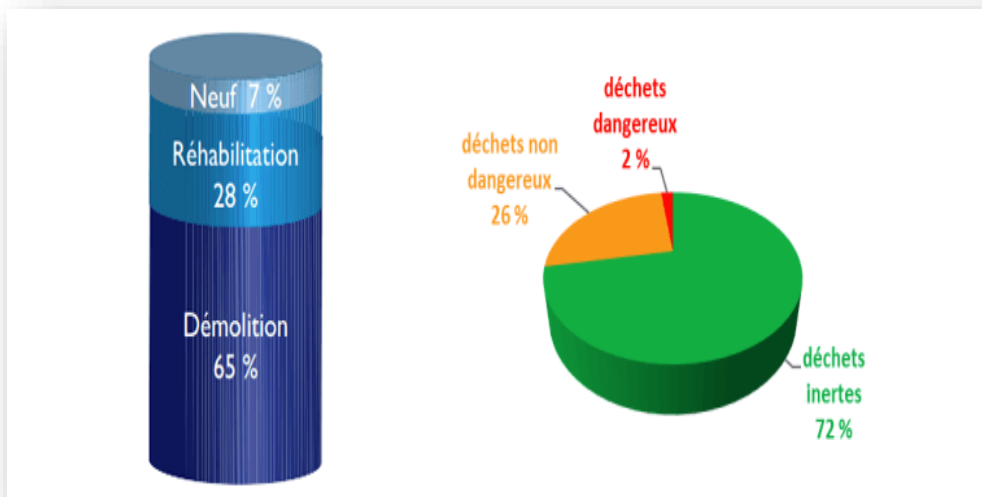


Figure 3-2: Compositions des déchets du bâtiment

#### ➤ Déchets dangereux (DD) :

- **Déchets industriels spéciaux (DIS) :** Ces déchets sont identifiés en raison de leurs propriétés dangereuses, comme la présence d'arsenic, de plomb, d'hydrocarbures ou issus de l'industrie pétrolière.

### *Chapitre 3 : Recyclage, préparation des déchets et utilisation dans le béton*

**Déchets ménagers spéciaux (DMS) :** Ce sont des déchets dangereux présents dans les ordures ménagères, tels que les aérosols, colles, détergents, insecticides, peintures, piles, tubes fluorescents et produits d'entretien. On parle également de DTQS (Déchets Toxiques en Quantité Dispersée). .[59]

- **Déchets non dangereux issus des activités économiques :** Ce sont des déchets générés par les entreprises qui, de par leur nature, s'apparentent à ceux du BTP ou des services publics (écoles, administrations, etc.). La loi les classe parmi les déchets ménagers et ils peuvent être collectés et éliminés comme tels. .[60]

#### ➤ **Déchets industriels banals (DIB) :**

Ce sont des déchets non dangereux produits par les secteurs de la fabrication, du commerce, de l'artisanat, des services, de la gestion des mines, de la peinture, de la chimie ou de la pétrochimie. Ils sont dits ordinaires et non inertes, et comprennent :

- ✚ Bois non traité ou traité sans produits dangereux
- ✚ Plastiques (PVC, polystyrène, polypropylène)
- ✚ Métaux ferreux et non ferreux
- ✚ Revêtements textiles de murs et sols
- ✚ Polystyrène expansé, polyuréthane
- ✚ Produits mélangés issus de sites de réhabilitation.[61]

#### ➤ **Déchets médicaux et pharmaceutiques :**

Ce sont les déchets générés par les activités de diagnostic, de contrôle, de traitement et de prévention en médecine humaine ou vétérinaire. Ils proviennent notamment des hôpitaux publics, des laboratoires d'analyses et des établissements de soins similaires.

#### **Origine de la production des déchets :**

La production des déchets est inéluctable pour les raisons suivantes :

- ↪ **Biologiques :** tout cycle de vie produit des métabolites ;
- ↪ **Chimiques :** toute réaction chimique est régie par le principe de la conservation de la matière et dès que veut obtenir un produit à partir de deux autres on en produira un quatrième ;
- ↪ **Technologiques :** tout procédé industriel conduit à la production de déchet ;
- ↪ **Économiques :** les produits en une durée de vie limitée ;

- ↳ **Écologiques** : les activités de la dépollution (eau, air) génèrent inévitablement d'autres déchets qui nécessiteront une gestion spécifique
- ↳ **Accidentelles** : l'inévitable dysfonctionnement des systèmes de production et de Consommation sont eux aussi à l'origine de déchets. [62]

### **3.2. Recyclage des déchets :**

#### **Définition :**

Le recyclage est une méthode de traitement des déchets industriels et ménagers qui permet de réintroduire, dans le cycle de production, les matériaux qui composent un produit. Il présente deux avantages écologiques majeurs : la réduction du volume des déchets et la préservation des ressources naturelles. Certains procédés de recyclage sont simples et peu coûteux, tandis que d'autres sont plus complexes, onéreux et nécessitent davantage de temps.

Le recyclage constitue une activité essentielle pour l'économie et pour l'amélioration des conditions de vie, notamment dans les pays à forte densité de population.

Il s'inscrit dans la stratégie dite des trois R pour la gestion des déchets :

- **Réduire** : qui englobe toutes les actions visant à limiter la production de déchets à la source.
- **Réutiliser** : qui consiste à donner une seconde vie à des produits usagés sans passer par une transformation industrielle.
- **Recycler** : qui désigne le traitement des déchets afin de récupérer les matériaux réutilisables.

Le recyclage contribue significativement à la diminution des déchets destinés à l'enfouissement ou à l'incinération. Toutefois, il ne suffit pas à lui seul à freiner l'augmentation constante de la production de déchets, ou n'y répond que partiellement. Par conséquent, pour lutter efficacement contre la croissance des déchets, le recyclage est indispensable, mais il doit s'inscrire dans une approche globale intégrant la réduction et la réutilisation.

#### **But du recyclage des déchets :**

Le recyclage des déchets dans le secteur du génie civil vise à préserver l'environnement, réduire les coûts et limiter l'exploitation des ressources naturelles comme les granulats issus des carrières et des lits de rivières. En réutilisant les résidus de chantiers dans la fabrication de matériaux tels que le béton ou l'enrobé, cette pratique permet de :

- Économiser les ressources naturelles,

### ***Chapitre 3 : Recyclage, préparation des déchets et utilisation dans le béton***

- Réduire le transport des matériaux,
- Limiter les déchets envoyés à l'enfouissement,
- Favoriser une mise en œuvre rapide des travaux.

Les matériaux recyclés, s'ils respectent les normes de qualité, peuvent offrir de bonnes performances techniques. Ainsi, le recyclage représente un levier essentiel pour une économie circulaire durable dans le domaine de la construction.[63]

#### **Techniques de recyclage des déchets :**

##### **3.2.1.1. Procédés du recyclage :**

Il existe trois grandes familles de technologies de recyclage : chimique, mécanique et organique.

- Le recyclage chimique repose sur des réactions chimiques permettant de séparer certains composants des déchets afin de les réutiliser.
- Le recyclage mécanique consiste à traiter les rebuts industriels ou les chutes de production pour les réintégrer dans le cycle de fabrication.
- Le recyclage organique comprend des procédés comme le compostage ou la fermentation, permettant de produire des engrais ou des carburants tels que le biogaz.[38]

##### **3.2.1.2. Étapes du recyclage :**

Le processus de recyclage comprend plusieurs étapes essentielles : [64]

- **Étape 1 : Collecte des déchets :**

Le recyclage commence par la collecte des déchets. Dans les pays développés, les déchets ménagers sont généralement traités par incinération dans des installations adaptées. Cependant, les déchets destinés au recyclage sont exclus de l'enfouissement ou de l'incinération et sont orientés vers des filières de transformation.

La collecte sélective, également appelée "tri à la source", est la méthode la plus répandue. Elle repose sur le principe selon lequel le producteur de déchets trie lui-même ses déchets recyclables, qui sont ensuite déposés dans des points de collecte spécifiques, généralement exonérés de taxe.

En complément des systèmes automatisés, un tri manuel est parfois effectué par des opérateurs sur tapis roulant afin d'assurer une meilleure séparation des matériaux.

### *Chapitre 3 : Recyclage, préparation des déchets et utilisation dans le béton*

- **Étape 2 : Transformation**

Une fois triés, les déchets sont acheminés vers des centres de traitement où ils subissent différents procédés de transformation. Ces déchets y entrent comme matière résiduelle et en ressortent sous forme de matériaux prêts à être réutilisés.

- **Étape 3 : Commercialisation et réutilisation**

Les matières premières secondaires obtenues après traitement sont ensuite utilisées pour la fabrication de nouveaux produits, qui seront remis sur le marché et proposés aux consommateurs.

#### **Gestion des déchets :**

##### **3.2.1.3. Définition :**

La gestion des déchets désigne l'ensemble des opérations liées à la collecte, au transport, au traitement, à la réutilisation ou à l'élimination des déchets, dans le but de limiter leurs impacts sur la santé humaine et sur l'environnement.

Elle s'applique à tous les types de déchets, qu'ils soient solides, liquides ou gazeux, chacun nécessitant une filière spécifique de traitement. Les méthodes de gestion varient en fonction du niveau de développement du pays concerné.

Dans les zones urbaines, la gestion des déchets non dangereux issus des ménages ou des collectivités est généralement assurée par les autorités locales. En revanche, les déchets issus des activités commerciales ou industrielles relèvent de la responsabilité directe des entreprises qui les produisent.[65]

##### **3.2.1.4. Principes de gestion des déchets :**

Il y a plusieurs principes qui guident la gestion des déchets dont l'usage varie selon les pays ou les régions.

#### **La hiérarchie des stratégies (règle des trois R) :**



La hiérarchie des stratégies a plusieurs fois changé d'aspect ces dix dernières années, mais le concept sous-jacent est demeuré la pierre angulaire de la plupart des stratégies de gestion des déchets : utiliser au maximum les matériaux et générer le minimum de

rebut. Certains experts en gestion des déchets ont récemment ajouté un « quatrième R » : « Repenser », qui implique que le système actuel présente des faiblesses et qu'un système parfaitement efficace exigerait qu'un regard totalement différent soit porté sur les déchets. Certaines solutions "repensées" sont parfois peu intuitives. On peut prendre par exemple un cas dans l'industrie textile : afin de réduire la quantité de papier utilisée pour les patrons, il a été conseillé de les découper dans de plus grandes feuilles, afin de pouvoir utiliser les chutes pour découper les petites pièces du patron. Ainsi, il y a une réduction du résidu global. Ce type de solution n'est bien entendu pas limité à l'industrie textile.

La réduction à la source nécessite des efforts pour réduire les déchets toxiques et autres résidus en modifiant la production industrielle. Les méthodes de réduction à la source impliquent des changements dans les processus de fabrication, les apports de matières premières et la composition des produits. Parfois le principe de « prévention de la pollution » indique en fait la mise en œuvre d'une politique de réduction à la source.

Une autre méthode de réduction des déchets à la source est d'accroître les incitations au recyclage. A titre d'exemple, plusieurs villes aux États-Unis ont mis en place des taxes dont le montant est fonction des quantités d'ordures déposées qui se sont révélées efficaces pour réduire le volume des déchets urbains. L'efficacité des politiques de réduction à la source se mesure à l'importance de la réduction de la production de déchets [66]

#### **3.2.1.5. Méthodes de gestion des déchets :**

La gestion des déchets consiste en la détermination du type de traitement à appliquer à telle ou telle autre catégorie des déchets. Certes pour assurer une bonne gestion des déchets, il faut mettre des moyens sur le plan financier que matériel, par conséquent, la bonne gestion limitera les dégâts sanitaires. C'est ainsi que nous allons examiner successivement les différents modes de gestion des déchets. Ces méthodes sont actuellement au nombre de cinq. [66]

##### **A. L'enfouissement :**

L'enfouissement est une méthode d'évacuation des déchets organiques qui consiste à creuser une fosse profonde de 0,5 à 1m pour y verser des déchets, asperger de l'essence et la couvrir d'une couche de terre afin de brûler sans fumée les déchets. Ce procédé utilise comme produits désinfectants ou désodorisants le chlore, la chaux, le mazout, et l'essence. Cette méthode reste très appropriée dans des formations sanitaires.



**Figure 3-3:** Enfouissement des déchets

### **B. L'incinération :**

C'est un procédé urbain d'élimination finale des déchets qui consiste à brûler au moyen d'un feu les déchets produits par les hôpitaux. Les procédés de l'incinération comprennent le ramassage des déchets et ordures, le triage pour dissocier les déchets combustible et non combustible. Elle peut être considérée comme un procédé par l'excellence de traitement des immondices, c'est une méthode satisfaisante qui présente cependant quelques inconvénients, parmi lesquels on peut citer :

- ✚ Elle nécessite une évacuation des cendres après son exécution,
- ✚ Elle provoque un danger de pollution de l'environnement par sa fumée,
- ✚ Elle nécessite un investissement et un coût d'exploitation élevés pour sa construction



**Figure 3-4:** Incinération en plein air et usine d'incinération

### **C. La décharge contrôlée**

La décharge contrôlée est un dépotoir public prévu à l'avance pour l'évacuation des immondices ménagères. Elle a l'avantage d'offrir des éléments pour l'alimentation des jardins ou des plantations d'arbres. Cette méthode n'est pas conseillée pour le traitement des déchets hospitaliers.



**Figure 3-5:** Photo d'une décharge contrôlée

### **D. Le compostage**

Le compostage est un procédé de décomposition des matières organiques usée de manière à le récupérer sous une autre forme permettant une utilisation ultérieure comme engrais. Il nécessite la préparation suivante : réception des ordures, triage des ordures, préparation des compostes, décomposition, présentation du produit fini.



**Figure 3-6:** Compostage de déchets organiques

### **E. Le recyclage**

Etant donné que tout ce qui est brûlé est irrémédiablement perdu en tant que matière première, c'est ainsi que le recyclage, qui a pour avantage de réduire la consommation en matière première pour la fabrication de nouveau bien, permet de minimiser l'impact en environnemental des déchets. Afin que les déchets recyclables puissent être effectivement recyclés, il est nécessaire qu'un pré-tri soit effectué en amont. Cette opération a pour objectif principal d'éviter un souillage des déchets recyclables par des déchets non recyclables. En effet, ceci pourrait les rendre impropres au recyclage. D'autre part, il permet d'orienter les différents déchets vers la bonne destination.



**Figure 3-7:** Usine de recyclage des déchets

### **3.3. Différents types de déchets :**

Les déchets sont de nature variable. Pour préserver les ressources de notre planète et limiter au maximum l'enfouissement des déchets qui ne peuvent pas être traités, les centres de tri et déchetterie ne cessent de développer des processus visant à trier, recycler et revaloriser les déchets avec des rendements de plus en plus performants. Il y a plusieurs différents types des déchets :

#### **Déchets ultimes :**

Le déchet ultime c'est un déchet, qui n'est plus susceptible d'être traité dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de la part valorisable ou par réduction de son caractère polluant ou dangereux. [67]

Le caractère ultime d'un déchet n'est pas fonction des caractéristiques « physico chimiques » du déchet mais s'apprécie en fonction du système global de collecte et de traitement. Cette notion est locale et doit normalement être précisée dans le cadre des plans départementaux d'élimination des déchets ménagers et assimilés. [68]

#### **Déchets inertes :**

Déchet qui ne subit aucune modification physique, chimique ou biologique importante, ne se décompose pas, ne brûle pas, et ne produit aucune réaction physique ou chimique, ne sont pas biodégradable et ne détériore pas d'autres matières avec lesquelles il entre en contact, d'une manière susceptible d'entraîner une pollution de l'environnement ou de nuire à la santé humaine. [69]

Ces déchets sont admissibles dans les installations de stockage et proviennent essentiellement des chantiers de bâtiment et de et de travaux publics ou d'industries de fabrication de matériaux de construction.

Ce sont notamment les déchets suivants :

- ❖ Les bétons réfractaires usés (collectés durant l'entretien de la zone cuisson).
- ❖ Les briques réfractaires usées (collectés durant l'entretien de la zone cuisson).
- ❖ Les palettes en bois.
- ❖ Sac en papier.
- ❖ Plastique.
- ❖ Les métaux.
- ❖ Les déchets de verre.
- ❖ Les remblais de décapage.
- ❖ Les isolants minéraux (laine de verre, de roche, de laitier, verre expansé). [70]

En général, ils sont constitués d'éléments minéraux stables ou inertes au sens de leur éco-compatibilité avec l'environnement. Ils de certaines activités d'extractions minières ou de déblais de démolition (terre, gravats, sables...). Ils peuvent être utilisés pour le remblaiement et les travaux routiers.

**Déchets d'emballages :**

Ce sont des déchets appartenant à la catégorie des (DIB) mais qui sont soumis à des objectifs de valorisation stricts. Ce sont principalement les palettes de bois, les emballages plastique (housses, polystyrène de calage, fûts et flacons non souillés, bouteilles, bidons...), les emballages en papier et en carton, les emballages métalliques non souillés (pots, fûts...). Les déchets d'emballages doivent être valorisés et remis à des entreprises agréées pour cette activité. [71]

**Déchets ménagers :**

Les déchets ménagers et assimilés recouvrent les ordures ménagères (OM) qui proviennent des ménages et tous les déchets gérés comme tels par les collectivités locales (déchets des artisans ou commerçants). [72]

**Déchets organiques :**

Les déchets organiques sont produits par tous les êtres vivants : animaux et végétaux morts, Dans le cycle naturel sont dégradés puis transformés en humus stocké dans le sol.

Les termes suivants recouvrent la même notion : bio déchets ou déchet fermentescibles ou FFOM (fraction fermentescible des ordures ménagères). Il s'agit de :

- ❖ Déchets végétaux des parcs et jardins (déchets verts).
- ❖ Déchets organiques de la cuisine (restes de repas, épluchures, papiers essuie-tout, papier).
- ❖ Journal, fleurs coupées, marc de café, filtres à café, sachets de thé, coquilles d'œufs, etc....
- ❖ Boues. [73]

**Déchets d'activités de soins :**

Les déchets d'activités de soins sont des déchets qui proviennent des soins médicaux ou vétérinaires, ou du secteur de la recherche médicale. Du fait de leur grande diversité, il est difficile de les classer de manière claire. En effet, les déchets d'activités de soins ont des provenances variées, qui vont des déchets de cuisine aux déchets humains et des caractéristiques toutes aussi variées. Par ailleurs, il n'est pas toujours évident de marquer un seuil entre un déchet hospitalier ne présentant aucun risque et un déchet contaminé. [73]

**Déchets médicaux :**

Tout déchet issu des activités de diagnostic, de suivi et de traitement préventif, palliatif ou curatif dans les domaines de la médecine humaine ou vétérinaire et tous les

### ***Chapitre 3 : Recyclage, préparation des déchets et utilisation dans le béton***

déchets résultant des activités des hôpitaux publics, des cliniques, des établissements de la recherche scientifique, des laboratoires d'analyses opérant dans ces domaines et de tous établissements similaires.[74]

#### **Déchets agricoles :**

Tout déchet organique généré directement par des activités agricoles ou par des activités d'élevage ou de jardinage. [74]

#### **Déchets industriels :**

Les déchets d'activités économiques (DAE), anciennement appelés déchets industriels, sont des déchets produits par les activités économiques (industrie, secteur manufacturier, bâtiment et travaux publics (BTP), secteur tertiaire, agriculture, etc.). Dans le cadre de la responsabilité élargie du producteur, le producteur est responsable de la gestion de ses déchets jusqu'à leur élimination ou leur valorisation finale. [75].

### ***3.4. Utilisation des déchets de brique dans le béton :***

#### **Définition des déchets de brique :**

Une brique est un élément de construction généralement en forme de parallélépipède rectangle constitué de terre argileuse crue, séchée au soleil (brique crue) ou cuite au four, employée principalement dans la construction de murs [76]. Ils sont des produits céramiques dont les argiles sont la matière première et parfois des additifs [77].

La brique rouge est le matériau de construction le plus utilisé dans la construction des murs en raison de leur facilité d'utilisation ; ces bonnes caractéristiques techniques et de leur adaptabilité au climat.

#### **Propriétés des déchets de brique :**

Les briques concassées sont fréquemment utilisées dans la fabrication du béton, et les performances obtenues avec ce type de matériau se sont révélées globalement satisfaisantes. Toutefois, malgré cette utilisation répandue, peu d'études systématiques ont été menées pour analyser en détail les différentes propriétés du béton incorporant des déchets de brique.[78] Les recherches et essais réalisés ont permis de dégager plusieurs caractéristiques notables, parmi lesquelles :

- ❖ Le taux d'absorption d'eau de la poudre de brique se situe entre 5 % et 15 % du poids à l'état sec. Il est donc recommandé de saturer les granulats de brique avant le mélange afin d'éviter une prise prématurée du béton.
- ❖ En pratique, et pour des raisons économiques, cette saturation peut être réalisée simplement par pulvérisation d'eau sur l'ensemble du stock de granulats, plutôt que par immersion complète pendant 30 minutes.
- ❖ Le procédé classique de formulation du béton peut être appliqué avec succès dans la production de béton à base de déchets de brique.

### *Chapitre 3 : Recyclage, préparation des déchets et utilisation dans le béton*

- ❖ L'intégration de granulats grossiers issus de briques permet d'obtenir un béton à haute résistance, tout en réduisant la masse volumique jusqu'à 15 %, bien que la résistance à la compression puisse diminuer d'environ 20 % par rapport au béton traditionnel. [79]
- ❖ La densité apparente du béton contenant des briques recyclées varie entre 2000 et 2080 kg/m<sup>3</sup>, soit environ 17 % de moins que celle d'un béton classique.
- ❖ La résistance à la compression du béton à base de brique concassée se situe entre 13,8 et 34,5 MPa.
- ❖ Enfin, pour un dosage équivalent, la résistance à la traction de ce type de béton est supérieure de 11 % à celle du béton ordinaire.[80]

#### **Caractéristiques du béton contenant le déchet de brique :**

Le béton doit être considéré sous deux aspects :

##### **a) Le béton frais :**

La propriété essentielle du béton frais est son ouvrabilité, c'est à dire son aptitude à remplir n'importe quel volume (coffrage ; moule...) et à enrober convenablement les armatures. A la clé, une grande liberté déforme.

- ✚ La consistance d'un béton est la grandeur qui caractérise son ouvrabilité
- ✚ La composition du béton et les moyens de sa mise en œuvre doivent être appropriés
- ✚ La teneur en eau doit être limitée au minimum compatible avec les exigences d'ouvrabilité. [81]

L'ouvrabilité peut s'apprécier de diverses façons et en particulier par des mesures de plasticité, il existe de nombreux essais et tests divers permettant la mesure de certaines caractéristiques dont dépend l'ouvrabilité. [82]

Cet essai est incontestablement un des plus simples et des plus fréquemment utilisés, car il est très facile à mettre en œuvre. C'est un essai essentiellement statique et assez limité dans sa plage de mesure pour les bétons très secs et pour les bétons très fluides.

##### **b) Le béton durci :**

Lorsque le béton a durci, sa forme ne peut plus être modifiée mais ses caractéristiques continuent d'évoluer pendant de nombreux mois, voire des années.

- ✚ Une bonne résistance à la compression est la performance souvent recherchée pour le béton durci.
- ✚ La durabilité.
- ✚ Les phénomènes de retrait sont une caractéristique prévisible dans l'évolution du béton
- ✚ Les caractéristiques de déformations sous charge du béton sont connues et peuvent être mesurées [83].

### *Chapitre 3 : Recyclage, préparation des déchets et utilisation dans le béton*

Le béton offre une grande pérennité face aux agressions physico-chimiques du milieu environnant (gel, pluie et pollution atmosphérique...). Il est particulièrement adapté pour la réalisation d'ouvrages devant résister à des conditions difficiles et extrêmes.

- ✚ La porosité et la compacité.
- ✚ Ces propriétés conditionnent les deux premières. Plus un béton est compact (ou moins, il est poreux), plus ses performances seront élevées et sa durabilité importante.
- ✚ On améliore la compacité du béton en optimisant la dimension et l'empilement des granulats et en réduisant la quantité d'eau.
- ✚ La tenue au feu.

La capacité d'isolation thermique et acoustique

- ✚ La résistance au choc [84]

#### **Conclusion**

La gestion des déchets dans le secteur de la construction est un enjeu crucial pour l'environnement et l'économie circulaire. Ce chapitre a exploré les différents types de déchets, notamment les déchets de brique, et leur recyclage pour une utilisation dans le béton. L'utilisation des déchets de brique permet de réduire l'impact environnemental et de valoriser des matériaux autrement inutilisables. Cependant, cela nécessite un suivi rigoureux des propriétés des matériaux recyclés pour garantir leur efficacité et durabilité dans les structures en béton. Cette approche participe à la transition vers des pratiques plus durables dans le génie civil

*Chapitre 04 :*

*Etude*

*Expérimentale*

## 4. Etude Expérimentale

### Introduction

Le béton constitue le matériau de base le plus employé dans le domaine de la construction en raison de ses performances mécaniques et de sa durabilité. Parmi les facteurs déterminants de ses propriétés finales, les conditions de durcissement, en particulier le processus de mûrissement ou cure, jouent un rôle fondamental. En effet, la température à laquelle s'effectue le mûrissement influence directement l'hydratation du ciment, impactant ainsi la résistance et la durabilité du béton.

Dans une perspective de développement durable, le recyclage et la valorisation des déchets issus du secteur de la construction, notamment les déchets de brique, représentent aujourd'hui une solution prometteuse. Cette approche vise non seulement à réduire le déséquilibre entre la demande croissante en granulats et leur disponibilité, mais aussi à limiter les effets néfastes sur l'environnement.

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer, de manière expérimentale, les performances mécaniques et la durabilité de bétons élaborés avec de la poudre de brique recyclée concassée utilisée comme ajout à des taux de 8 % et 15 % du poids du ciment. Les éprouvettes fabriquées ont été soumises à différents modes de mûrissement, afin d'analyser l'effet de la température de cure sur les caractéristiques du béton après 28 jours de conservation.

Enfin, il convient de souligner que la caractérisation physique des matériaux ainsi que l'ensemble des essais expérimentaux sur les échantillons de béton ont été réalisés au Laboratoire pédagogique de génie civil de l'Université Mohamed Boudiaf de M'sila.

### 4.1. Caractérisation des matériaux utilisés :

Les caractéristiques des matériaux utilisés pour la confection des différents échantillons du micro béton et la méthode de formulation nous permet de suivre l'évolution des différentes propriétés des éprouvettes réalisées Les matériaux utilisés sont :

- ❖ Le ciment : la norme Algérienne (NA442 -2013) et Européenne (EN197-1)
- ❖ Sable concassé (0/5)
- ❖ Un gravier (3/8) et ( 8/16)
- ❖ Eau de gâchage (l'eau de robinet du laboratoire).
- ❖ L'adjuvant : Sikaplast BV 40+
- ❖ Déchets de brique (poudre de brique concassé comme ajout)

### Le ciment : Ciment portland NA442CEMII/B-L42,5N

Le ciment utilisé dans cette étude est un ciment gris de type CEM II 42.5, produit par la cimenterie GICA - Aïn Touta. Ce produit, commercialisé sous le nom Matine, est un ciment destiné aux bétons à haute performance, utilisés dans la construction des ouvrages d'art, des infrastructures et des superstructures pour bâtiments. Ce ciment est certifié conforme à la norme algérienne NA 442 – 2013 ainsi qu'à la norme européenne EN 197-1, ce qui le rend apte à l'emploi dans les grands projets de construction. Les propriétés physiques et chimiques de ce ciment ont été analysées conformément aux normes mentionnées, et les données techniques ont été présentées selon la fiche technique du ciment.



Figure 4-1: Le Ciment portland

### Applications recommandées :

- ✚ Construction d'ouvrages d'art, infrastructure et superstructure pour bâtiments
- ✚ Préfabrication légère
- ✚ Béton de haute performance

### Dosages :

Sauf pour composition spécifique, dosage moyen pour béton courant

### Caractéristiques techniques Analyses chimiques :

- ✚ Teneur en sulfates (SO<sub>3</sub>) < 2,5%
- ✚ Teneur en Chlorures (Cl) < 0,1%
- ✚ Teneur en (MgO) < 1%
- ✚ Perte au feu (PAF): 0,5–1,5%

### Composition minéralogique du clinker (Selon BOGUE) :

C3S > 60±3% C3A: 3 – 7, 5 %

### Propriétés physiques :

- + Consistance normale : 26 à 28%
- + Début de prise ≥ 60min
- + Fin de prise : 200 à 350min
- + Expansion <5mm
- + Finesse (SSB) : 3200-3800 (Cm<sup>2</sup>/g).

### Résistance à la compression :

- + 2 jours (EN 196-1) ≥ 10 Mpa
- + 28 jours (EN 196-1) ≥ 42.5 Mpa

### Consignes de sécurité :

- + Mettre hors de portée des enfants
- + N'inhalez pas la poussière
- + Eviter tout contact avec la peau et les yeux.
- + Utiliser des équipements adaptés : gants, chaussures de sécurité

#### 4.2. Essais sur les granulats

##### Analyse Granulométrique :

Les granulats sont des grains minéraux, naturels ou artificiels, dont la taille varie entre 0 et 125 mm. Ils sont utilisés principalement dans la fabrication des mortiers, bétons et structures routières. Selon leur dimension, ils portent différentes appellations : filler, sable, gravillon, grave ou ballast.



**Figure 4-2:** Analyse granulométrique

### **A. Principe de l'essai :**

L'essai de tamisage a pour objectif de répartir un matériau en différentes classes granulométriques décroissantes à l'aide d'une série de tamis normalisés. Les masses retenues sur chaque tamis, ainsi que celle passée au tamis le plus fin, sont rapportées à la masse totale initiale de l'échantillon. Les pourcentages obtenus permettent de tracer la courbe granulométrique, outil essentiel pour l'analyse de la distribution des grains.

### **B. Mode opératoire de l'analyse granulométrique :**

- ✚ Assembler la colonne de tamis en les disposant dans l'ordre décroissant des ouvertures de maille, puis fixer le couvercle en haut et le fond en bas.
- ✚ Introduire la quantité de matériau sec à analyser dans la colonne de tamis.
- ✚ Soumettre l'ensemble à une agitation mécanique à l'aide d'un agitateur automatique pendant une durée appropriée.
- ✚ Après agitation, démonter la colonne en récupérant chaque tamis, en commençant par celui à plus grande ouverture, en y adaptant un fond et un couvercle pour éviter toute perte de matière.
- ✚ Peser avec précision, à l'aide d'une balance électronique, la quantité de matériau retenue sur chaque tamis.
- ✚ Vérifier la validité de l'essai conformément à la norme NF EN 933-1, en s'assurant que la différence entre la somme des masses retenues (refus et passant) et la masse initiale de l'échantillon reste dans les tolérances acceptables.

**C. Les résultats des analyses granulométriques :**

**Tableau 4-1:** l'analyse granulométrique du gravier (3/8) concassé :

Poids initial sec		2000 G			
Module	Maille tamis	Refus partiel (gr)	Refus cumulé (gr)	% Refus	% Tamisât
	8	0	0	0	100
	6.3	460	460	23	77
	5	380	840	42	58
	4	600	1440	72	28
	2.5	340	1780	89	11
Fond	0	220	200	100	0

**Tableau 4-2:** l'analyse granulométrique du gravier (8/16) concassé :

Poids initial sec		1500 G			
Module	Maille tamis	Refus partiel (gr)	Refus cumulé (gr)	% Refus	% Tamisât
	16	0	0	100	0
	12.5	7.5	7.5	99.5	0.5
	10	202.5	210	86	14
	8	825	103.5	31	69
	6.3	277.5	1312.5	12.5	87.5
	5	127.5	1440	4	96
Fond	0	6	1500	0	100

Tableau 4-3: L'analyse granulométrique d'un sable concassé 0/5 :

Poids initial sec		1500 G			
Module	Maille tamis	Refus partiel (gr)	Refus cumulé (gr)	% Refus	% Tamisât
	5	0	0	100	0
	4	15	15	99	1
	2.5	210	225	35	15
	1.25	735	960	36	64
	0.63	210	1170	22	78
	0.315	255	1425	5	95
	0.16	30	1435	3	97
Fond		45	1500	0	100

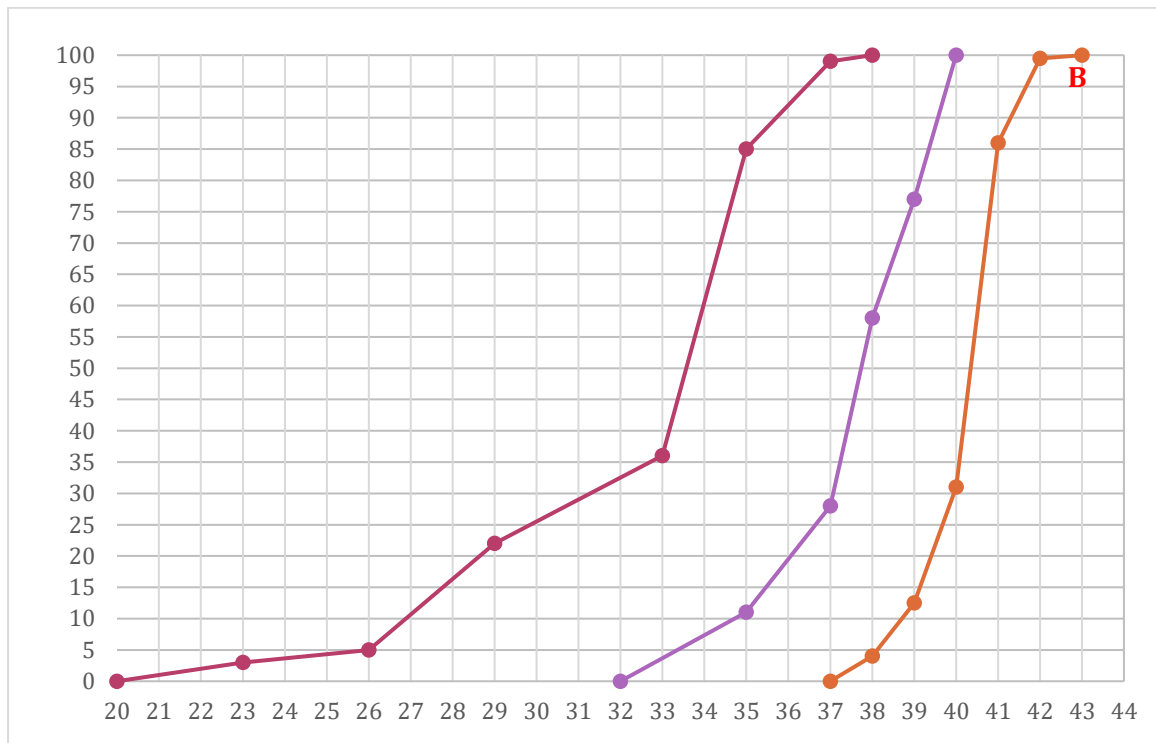


Figure 4-3: Analyse granulométrique des différents granulats

**Masse volumique apparente du gravier :**

**a. But de l'essai :**

Cet essai a pour but de déterminer la masse d'une fraction granulaire, notamment lors de l'élaboration d'une composition de béton. Ce paramètre permet, en particulier, de calculer la masse ou le volume de gravier nécessaire pour obtenir un béton aux caractéristiques imposées

**b. Mode opératoire de l'essai :**

- ✚ Déterminer le volume du récipient = V
- ✚ Noter la masse du récipient propre et vide = M<sub>0</sub>
- ✚ Placer le récipient dans le bac en plastique
- ✚ Verser les granulats secs par couches successives sans tassement, en utilisant les mains comme entonnoir naturel
- ✚ Araser à l'aide d'une règle métallique par un mouvement horizontal de va-et-vient
- ✚ Noter la masse du récipient rempli = M<sub>1</sub>
- ✚ Vider les granulats dans un autre bac en plastique
- ✚ Répéter l'opération au moins trois fois avec un autre échantillon du même type

La masse volumique apparente est donnée par :

$$\rho_{app} = \frac{(M_2 - M_1)}{V_r}$$

**Tableau 4-4:** Masse volumiques apparente de gravier3/8

N°d'Essai	M1(Kg)	M2(kg)	ρ app(kg/l)	Pappmoyen(kg/l)
1	2934	12668	1.39	1.38
2	2934	12627	1.36	
3	2934	12560	1.37	

**Tableau 4-5:** Masse volumiques apparente de gravier8/16

N°d'Essai	M1(Kg)	M2(kg)	ρ app(kg/l)	Pappmoyen(kg/l)
1	3.501	17.196	1.36	1.36
2	3.501	17.052	1.35	
3	3.501	17.055	1.35	

**Masses volumiques absolues :**

Cet essai est régi par la norme **NF P18-301** ; il est défini comme étant la masse volumique de la matière constituant le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister entre les particules.

**a. But de l'essai :**

L'objectif de cet essai est de connaître la qualité de la fraction granulaire, notamment lors de la formulation d'un béton. Ce paramètre permet de déterminer la masse ou le volume de différentes classes de particules mélangées, en vue d'obtenir un béton aux propriétés bien définies. Dans ce travail, nous avons utilisé la méthode du cylindre gradué, qui est simple, rapide et ne nécessite qu'un matériel de laboratoire courant.

**b. Mode opératoire :**

- ✚ Placer le tube à essai dans un récipient en plastique.
- ✚ Remplir le tube d'eau jusqu'à environ la moitié de sa hauteur et noter le volume V1.
- ✚ Préparer un échantillon de granulat sec de masse M (environ 400 g).
- ✚ À l'aide d'un entonnoir, verser l'échantillon dans le tube, puis agiter le mélange avec une tige pour éliminer l'air emprisonné.
- ✚ Noter le nouveau volume de l'eau dans le tube : V2.
- ✚ Verser le contenu du tube dans un seau en plastique et jeter le mélange.
- ✚ Répéter l'opération au moins trois fois.

La densité absolue est donnée par la formule :

$$\rho_{abs} = \frac{M}{(V_2 - V_1)}$$

**Tableau 4-6:** Masse volumiques absolue de gravier3/8.

N° d'essai	M1(g)	V1 (ml)	V2 (ml)	ρ abs(g/ml)	ρ abs moyen(g/ml)
1	400	400	550	2.66	2.65
2	400	400	551	2.63	
3	400	400	550	2.66	

Tableau 4-7: Masse volumiques absolue de gravier 8/16.

N° d'essai	M1 (g)	V1 (ml)	V2 (ml)	$\rho$ abs (g/ml)	$\rho$ abs moyen (g/ml)
1	400	400	550	2.66	2.66
2	400	400	551	2.64	
3	400	400	549	2.68	

**Sable concassé (0/5) :**

**a) Equivalant desable NF-18-598 :**

Cet essai a pour but de mesurer la propreté d'un sable, c'est-à-dire la quantité de particules fines et d'éléments fins présents dans le sable.

**Mode opératoire :**

- ✚ Tamiser une quantité de sable (masse supérieure à 500 g).
- ✚ Prendre une pesée de 120 g.
- ✚ Remplir l'éprouvette de solution lavante jusqu'au premier repère (10 cm).
- ✚ À l'aide de l'entonnoir, verser la prise d'essai (120 g) dans l'éprouvette et taper fortement à plusieurs reprises avec la paume de la main afin de chasser toutes les bulles d'air et favoriser le mouillage de l'échantillon.
- ✚ Laisser reposer pendant 10 minutes.
- ✚ Fermer l'éprouvette à l'aide du bouchon en caoutchouc et lui imprimer 90 cycles de coups horizontaux en 30 secondes à la main ou à l'aide d'un agitateur mécanique.
- ✚ Retirer ensuite le bouchon, le rincer avec la solution lavante au-dessus de l'éprouvette.
- ✚ Rincer ensuite les parois de celle-ci.
- ✚ Faire descendre le tube laveur dans l'éprouvette, le rouler entre le pouce et l'index en faisant tourner lentement le tube et l'éprouvette, et en imprimant en même temps au tube un léger piquage. Cette opération a pour but de laver le sable et de faire monter les éléments fins et argileux. Effectuer cette opération jusqu'à ce que la solution lavante atteigne le 2<sup>e</sup> repère. Laisser ensuite reposer pendant 20 minutes.

**Équivalent de sable visuel (ESV) :**

Après 20 minutes de dépôt du sable, lire la hauteur  $h_1$  du niveau supérieur du floculant jusqu'au fond de l'éprouvette à l'aide d'une réglette. Mesurer également avec

$$ESV = \frac{h_2}{h_1} * 100$$

la règle la hauteur  $h_2$  comprise entre le niveau supérieur de la partie sédimentaire et le fond de l'éprouvette.

Où :  $h_2 > h_1$  avec :  $h_1$  : sable propre + éléments fins.

**Équivalent de sable au piston (ESP) :**

- ✚ Introduire le piston dans l'éprouvette et le laisser descendre doucement jusqu'à ce qu'il repose sur le sédiment. À cet instant, bloquer le manchon du piston et retirer celui-ci de l'éprouvette.
- ✚ Introduire la règle dans l'encoche du piston jusqu'à ce que le zéro vienne buter contre la face intérieure de la tête du piston, soit la partie sédimentée.

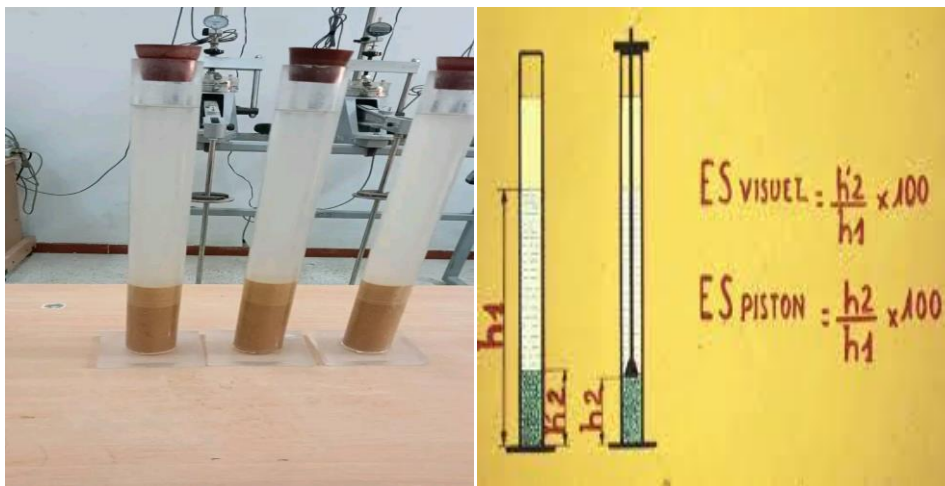


Figure 4-4: Essai d'équivalent de sable

Tableau 4-8: Equivalent du sable concassé.

N <sup>o</sup> d'essais	h1(cm)	h'2(cm)	ESV(%)	h2(cm)	h'2(cm)	ESP (%)
1	9	9	81	9	11	72.81
2	9	8.80	82.56	9	10.90	73.76
3	9.1	9	81.25	9.1	11.20	72.25

(ESV) moy=81.87%(ESP) moy=72.94%

Donc :54%.<ESV

60% <ESP



Figure 4-5: Essais d'équivalent dessable.

Tableau 4-9: Comparaison des résultats.

E.S.V	E.S.P	Nature et qualité du sable
ES<65	ES<60	Sable argileux : Risque de retrait ou de gonflement à rejeter pour des bétons de qualité
65<ES<7 5	65<ES<7 0	Sable légèrement argileux, de propriété admissible pour des bétons de qualité courante, quand on ne craint pas particulièrement le retrait.
75≤ES≤8 5	70≤ES≤8 0	Sable propre à faible pourcentage de fines argileuses, convient parfaitement pour des bétons de haute qualité.
E.S≥85	E.S>80	Sable très propre : l'absence totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton, qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.

**Résultats**

Notre sable est un sable propre à faible pourcentage de fines argileuses, convient parfaitement pour des bétons de haute qualité.

**b) Masses volumiques apparentes :**

Cet essai a pour but de permettre de connaître la masse d'une fraction granulaire lorsque, par exemple, on élabore une composition de béton. Ce paramètre permet, en particulier, de déterminer la masse ou le volume des sables malaxés pour l'obtention d'un béton dont les caractéristiques sont imposées.

**Principe de l'essai :**

Le principe de cet essai est de remplir un récipient gradué (200 ml) et de déterminer la masse du contenu. Matériel utilisé : récipient gradué, balance, sable.

**Mode opératoire :**

Dans cet essai, on procède comme suit : on met l'échantillon dans le récipient gradué (d'environ 200 ml), puis on pèse le récipient à l'aide d'une balance. Ensuite, on note les masses et les volumes pour calculer la masse volumique. La masse volumique apparente est donnée par la formule suivante :

$$\rho_{app} = \frac{(M_2 - M_1)}{V_r}$$

Tableau 4-10: Masses volumiques apparentes de sable concassée 0.5.

N°d'essais	M1 (g)	M2 (g)	Papp (g/cm3)	ρ app moye(g/cm3)
1	218	1840	1.62	1.63
2	218	1855	1.63	
3	218	1851	1.63	

**c) Masses volumiques absolues :**

C'est la masse de l'unité de volume absolu d'un corps, c'est-à-dire de la matière qui constitue le corps sans tenir compte du volume des vides.

La masse volumique absolue du sable est calculée d'après la formule suivante :

$$\rho_{abs} = \frac{M}{(V_2 - V_1)}$$

Tableau 4-11: Masses volumiques absolues de sable concassée 0.5

N° d'essais	M1 (g)	M2 (g)	Pabs (g/cm3)	ρ abs moye(g/cm3)
1	300	410	2.12	2.79
2	300	407	2.80	
3	300	405	2.85	

d) **Module de finesse (EN196-6) :**

C'est un facteur très important qui permet de juger de la grosseur du sable. Il est exprimé par le rapport de la somme des refus cumulés des tamis de mailles : [0.16 – 0.315 – 0.63 – 1.25 – 2.5 et 5 (mm)] sur 100, et est calculé par la relation suivante :

$$M_f = \sum \frac{R_c}{100}$$

Où :

**RC : Refus cumulé.**

Les normes soviétiques spécifient le module de finesse (Mf) des sables comme suit :

- Sable gros  $M_f \geq 2.5$
- Sable moyen  $2 < M_f < 2.5$
- Sable fin  $1.5 < M_f < 2$
- Sable très fin  $1 < M_f < 1.5$

$$M_f = \sum_{100}^{RC} 2.87, \text{ C'est un sable Gros}$$

1) **Porosités (NF P18-554 et NF P18-555) :**

C'est la masse de l'unité de volume absolu d'un corps, c'est-à-dire de la matière qui constitue le corps sans tenir compte du volume des vides.

$$P(\%) = [1 - \rho_{app} / \rho_{abs}] \times 100$$

2) **Compacité :**

La compacité d'un matériau est la proportion de son volume réellement occupée par la matière solide qui le constitue. C'est-à-dire, le rapport entre le volume absolu des grains et le volume apparent du matériau. La compacité est donnée par la formule suivante :

$$C = (\rho_{app} / \rho_{abs}) = 100 - P$$

3) **Indice des vides :**

L'indice des vides est le rapport entre le volume des vides et le volume des solides.

$$I = P/C$$

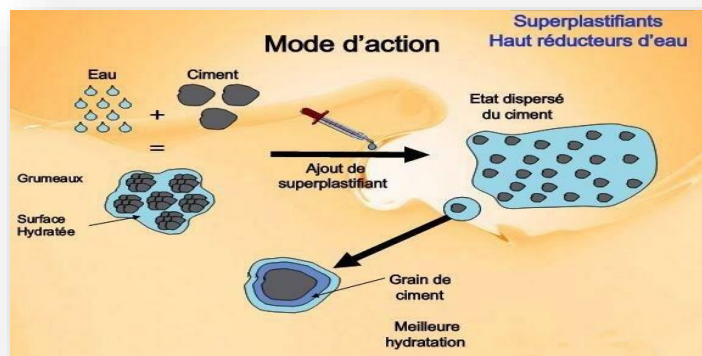
**Tableau 4-12:** La porosité, la compacité. L'indice de vide pour le sable concassé

Porosité P(%)	Compacité C(%)	Indice des vides
41.57	58.43	0.711

**4.3. Les Adjuvants dans le Béton :**

Les adjuvants sont des produits chimiques ajoutés en petite quantité au béton afin d'en modifier certaines propriétés à l'état frais ou durci. Ils permettent notamment d'améliorer la maniabilité, de réduire le rapport eau/ciment, ou de modifier le temps de prise.

Parmi eux, les super plastifiants jouent un rôle essentiel : ils permettent de réduire considérablement la quantité d'eau sans altérer la consistance, ou d'augmenter fortement la fluidité sans changer le dosage en eau. Ils sont indispensables pour la fabrication de bétons fluides, autoplaçants et à hautes performances. Utilisés judicieusement, les adjuvants contribuent à la durabilité, la résistance mécanique et à l'optimisation des ressources dans les ouvrages modernes.



**Figure 4-6:** Mécanisme d'action des plastifiants et super plastifiants

**Informations sur le produit Sika® Plastiment® BV-40 :**

Est un plastifiant réducteur d'eau énergétique qui : augmente la compacité du béton, entraînant ainsi une amélioration des résistances mécaniques et de l'imperméabilité

- facilite la mise en place du béton permet éventuellement de réduire le dosage en ciment
- permet d'obtenir un retard de début de prise plus ou moins important en augmentant le dosage normal d'utilisation de béton à performances élevées, aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci.

**Caractéristiques / avantages :**

Sika® Plastiment® BV-40, grâce à ses propriétés physico-chimiques permet :

**Sur béton frais :**

- D'augmenter considérablement la maniabilité même en réduisant l'eau de gâchage
- De disperser le ciment dans la masse
- D'améliorer l'adhérence béton-armatures
- De s'opposer à la ségrégation
- D'améliorer la thixotropie
- D'étaler éventuellement la prise

**Sur béton durci :**

- D'augmenter les résistances mécaniques,
- D'accroître la compacité
- D'augmenter l'imperméabilité
- De diminuer le retrait et le fluage

Sika® Plastiment® BV-40 est compatible avec tous les ciments et en particulier le ciment fondu.



**Figure 4-7:** Sika® Plastiment® BV-40

**Agréments / Normes :**

- Caractéristiques sur béton frais, résistances mécaniques à 7 et 28 jours, perméabilité, capillarité : CEMEREX - PV n° 363. 1.014 du 11.02.72.

- Résistances mécaniques à 7, 28, 90 et 365 jours : EMPA ZURICH - PV n° 59239/32 du 10.02.69
- Conformité à la norme ASTM C 494 type A : TESWELL Laboratoires (USA) - PV n° IZ-15 du 23.08.79

#### **4.4. L'eau de gâchage :**

L'eau de gâchage constitue un élément fondamental dans la fabrication du béton. Elle est introduite au moment du malaxage afin d'assurer l'hydratation du ciment et de permettre la liaison entre les différents constituants du béton. Elle joue également un rôle clé dans la maniabilité du mélange, facilitant ainsi sa mise en œuvre. Toutefois, pour garantir les performances du béton, l'eau utilisée doit être propre, exempte d'impuretés chimiques ou organiques, et introduite en quantité contrôlée. Un excès d'eau ou une eau de mauvaise qualité peut entraîner une diminution notable de la résistance et de la durabilité du béton.

#### **4.5. La formulation des bétons :**

##### **L'objectif de la formulation du béton :**

L'objectif principal de la formulation d'un béton est de déterminer les proportions optimales de ses constituants afin d'atteindre les performances souhaitées. Ces performances se déclinent selon plusieurs critères :

- ❖ Une **consistance appropriée** à l'usage prévu, généralement évaluée par l'essai d'affaissement au cône d'Abrams, noté  $h$  ;
- ❖ Une **résistance mécanique conforme aux exigences**, notamment à 28 jours, notée  $f_{cm28}$  (résistance moyenne) ;
- ❖ Une **durabilité suffisante**, qui impose une résistance caractéristique minimale, un dosage minimal en liant équivalent  $(C + kA)$ , ainsi qu'un rapport maximal  $E / (C + kA)$ .

La formulation du béton doit ainsi répondre à ces exigences tout en optimisant le coût de production. Cela implique, en pratique, de limiter la quantité de ciment tout en respectant le dosage minimal requis pour garantir la qualité du béton.

Même si des outils de calcul sont aujourd'hui disponibles pour aider à cette tâche, il demeure essentiel de comprendre l'influence des différents paramètres sur les propriétés finales du béton. En effet, la grande variabilité des matériaux, ainsi que l'évolution constante des adjuvants, rendent impossible une prise en compte exhaustive de tous les facteurs. C'est pourquoi une bonne compréhension théorique, complétée par des essais expérimentaux, reste indispensable pour toute démarche de formulation efficace.

### **Quelques méthodes de composition des bétons :**

Le calcul de la composition du béton a pour objectif de déterminer les dosages en ciment, en granulats (fins et grossiers) ainsi qu'en eau pour la fabrication d'un mètre cube de béton frais. L'objectif est d'obtenir un mélange homogène, de bonne ouvrabilité et présentant une résistance mécanique satisfaisante. Il existe plusieurs méthodes de formulation du béton, utilisées et adaptées selon les pratiques et normes en vigueur dans différents pays. Parmi ces méthodes, on peut citer :

- ✚ La méthode de Bolomey (méthode à granularité continue)
- ✚ La méthode de Joisel
- ✚ La méthode de Valette
- ✚ La méthode de Dreux-Gorisse
- ✚ La méthode des volumes absolus
- ✚ La méthode générale du CES (Centre d'Essai des Structures)

L'objectif commun à toutes ces méthodes est de déterminer la combinaison optimale des matériaux afin de produire un béton répondant aux propriétés requises, tout en étant économiquement rentable.

Dans le cadre de notre travail, nous avons choisi d'appliquer la méthode pratique de Dreux-Gorisse, reconnue pour sa simplicité et son efficacité dans les projets courants de formulation du béton.

#### **IV. 6.3. Méthode de formulation de Dreux-Gorisse (réécriture améliorée) :**

La méthode de Dreux-Gorisse est une approche pratique largement utilisée pour la formulation du béton. Elle vise à simplifier le processus de dosage tout en assurant une efficacité maximale. Cette méthode repose sur une recherche simultanée de deux objectifs principaux : la résistance mécanique du béton (notamment à la compression) et son ouvrabilité, en se basant sur les paramètres essentiels liés aux matériaux utilisés, tels que la dimension maximale des granulats (D).

L'approche Dreux-Gorisse permet de déterminer avec précision les quantités optimales des différents constituants nécessaires pour produire un mètre cube de béton : l'eau (E), le ciment (C), le sable (S), les gravillons (g) et le gravier (G), tout en respectant les exigences du cahier des charges.

La démarche comprend plusieurs étapes de calcul successives, parmi lesquelles :

- ❖ Le choix du rapport C/E (ciment/eau) selon les performances souhaitées,
- ❖ Le calcul des quantités de ciment et d'eau,
- ❖ La recherche du mélange granulaire à vides minimaux,
- ❖ La détermination de la compacité globale du béton,

- ❖ Et enfin, l'ajustement des masses de chaque granulat.

Grâce à cette méthode, il est possible de concevoir un béton performant, économique et adapté à des usages spécifiques en construction.

#### Détermination du dosage en ciment :

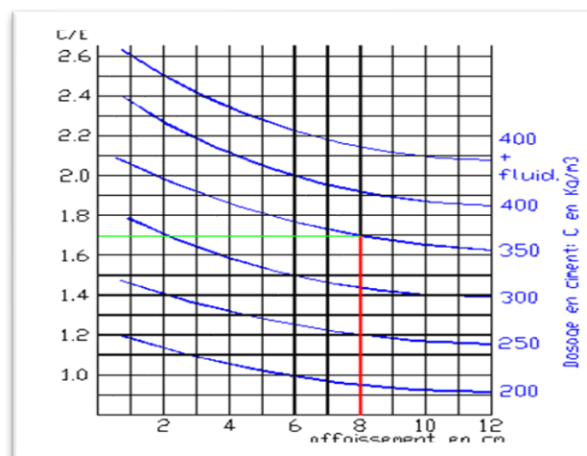
La première étape consiste à évaluer le rapport E/C (eau/ciment) en fonction de la résistance mécanique souhaitée à 28 jours, en se basant sur la formule suivante :

$$R_b = G \cdot R_c (E/C - 0.5)$$

Où :

- ❖ **R<sub>b</sub>** : Résistance à la compression prévue du béton à 28 jours (en bars),
- ❖ **G** : Coefficient granulaire (dépend de la granularité du mélange),
- ❖ **R<sub>c</sub>** : Résistance réelle du ciment à 28 jours (classe du ciment, en bars).

Une fois le rapport E/C déterminé en fonction de la résistance et de la fluidité souhaitée (ouvrabilité), donnée généralement dans le cahier des charges, on peut alors en déduire le dosage en ciment à l'aide d'un abaque ou d'une table de corrélation.



**Figure 4-8:** Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E.

**Tableau 4-13:** Valeurs du coefficient granulaire G

Valeurs du coefficient granulaire G			
Qualité des Granulats	Dimension des granulats D(mm)		
	Fins	Moyens	Gros
	$D \leq 12.5$	$20 \leq D \leq 31.5$	$D \leq 40$
Excellente	0.55	0.60	0.65
Bonnecourante	0.45	0.5	0.55
Passable	0.35	0.4	0.45

**Détermination du dosage en eau :**

En connaissant le rapport C/E (ciment/eau) ainsi que le dosage en ciment (C), on peut déterminer le dosage total en eau (E) à prévoir à l'aide de la formule suivante :

$$E = C \cdot (E/C)$$

**Détermination du dosage en granulats :**

Le pourcentage de sable et de gravier est déterminé à partir de la courbe granulaire de référence construite selon l'une des méthodes de formulation du béton, en particulier la courbe OAB.

Courbe granulaire OAB :

- ❖ Le point B, situé à l'ordonnée 100 %, correspond à la dimension D du plus gros granulats.
- ❖ Le point de brisure A est défini par des coordonnées particulières :

Sur l'axe des abscisses :

- ❖ Si  $D \leq 20$  mm, l'abscisse est D/2
- ❖ Si  $D \geq 20$  mm, l'abscisse est située au milieu du segment gravier délimité par le module 37 (soit 4 mm) et le module correspondant à Dmax.

Sur l'axe des ordonnées :

La valeur est donnée par la formule suivante :

$$YA = 50 - \sqrt{D + K + K_s + K_p}$$

Définitions des coefficients :

- $K_s$  : Coefficient d'ajustement de la granularité du sable
  - Si  $FM > 2,8$  :  $K_s = 5,4 \times FM - 15$
  - Si  $FM$  varie entre **2 et 3** :  $K_s = 6 \times FM - 15$

**K** : Terme correcteur

Ce terme dépend de plusieurs facteurs :

- ✓ Le dosage en ciment,
- ✓ L'efficacité du serrage (compactage),
- ✓ La forme des granulats (roulés ou concassés), notamment celle du sable qui a une influence majeure,
- ✓ Le module de finesse du sable, dont la valeur est donnée dans un tableau de référence.

**Tableau 4-14:** Valeur du terme correcteur K

Vibration		Faible		Normale		Puissante	
Format des granulats		Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé
Dosage ciment	400 +f	-2	0	-4	-2	-6	-4
	400	0	+2	-2	0	-4	-2
	350	+2	+4	0	+2	-2	0
	300	+4	+6	+2	+4	0	+2
	250	+6	+8	+4	+6	+2	+4
	200	+8	+10	+6	+8	+4	+6

La courbe granulaire de référence OAB doit être tracée sur le même graphique que les courbes granulométriques des granulats constitutifs. Ensuite, on délimite les lignes de séparation entre les différents granulats en traçant des droites reliant le point situé à 95 % de la courbe du granulat le plus fin au point de départ du granulat suivant, et ainsi de suite pour chaque fraction. Aux points d'intersection entre ces droites de partage et la courbe de référence, on détermine le pourcentage en volume absolu de chaque

granulat (notés  $g_1, g_2, g_3$ , par exemple). Dans le cas du ciment, si son dosage est connu, on peut calculer son volume absolu à l'aide de la relation suivante :

$$C=C/\rho_c$$

$\rho_c$  : C'est la masse volumique spécifique des grains de ciment. Le volume absolu de l'ensemble des granulats est donné par la relation suivante :

$$V=(1000x\gamma)-c.$$

Où :

$\gamma$  : Coefficient de compacité, dont la valeur est donnée par le tableau correspondant.

Tableau 4-15: Coefficients de compacité

Consistance	Serrage	Coefficient $\gamma$ en fonction du diamètre D des granulats						
		D=5	D=10	D=12,5	D=20	D=31,5	D=50	D=80
Molle	Piquage	0,750	0,780	0,795	0,805	0,810	0,815	0,820
	Vibration faible	0,755	0,785	0,800	0,810	0,815	0,820	0,825
	Vibration normale	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
Plastique	Piquage	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
	Vibration faible	0,765	0,795	0,810	0,820	0,825	0,830	0,835
	Vibration normale	0,770	0,800	0,815	0,825	0,830	0,835	0,840
	Vibration puissante	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
Ferme	Vibration faible	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
	Vibration normale	0,780	0,810	0,825	0,835	0,840	0,845	0,850
	Vibration puissante	0,785	0,815	0,830	0,840	0,845	0,850	0,855

a. Dosage en ciment :

➤  $C=350\text{kg/m}^3$  valeur prescrite.

**b. Dosage en eau :**

➤ On a  $C=350\text{kg/m}^3$

➤ Et affaissement = 8cm (béton plastique)

➤ Après l'abaque :  $C/E= 1.76 \rightarrow E/C= 0.568$

↳ Alors :  $E=350/1.76 =198.86\text{l/m}^3$

On a un **Dmax=16mm** qui correspond à une correction de **4%** en plus de la quantité d'eau calculée donc on obtient:

$E=F_{calculée}+0.04 \times F_{calculée}=198.86+0.04 (198.86)=206.81$  Litre E après correction.

**Dosage des granulats :**

La granularité du mélange obtenu peut être représentée de manière simplifiée par deux segments de droite formant une courbe théorique approchant la courbe granulométrique réelle. Cette modélisation est pertinente car elle reste suffisamment proche de la courbe réelle pour en conserver la signification, tout en étant déterminable à partir de seulement trois points caractéristiques : O (origine), A (point de brisure) et B (extrémité).

Pour les granulats destinés au béton, il a été constaté que les points O, A et B restent fixes, indépendamment des proportions du mélange.

- A. Le point d'origine **O** est défini par les coordonnées [0.08 mm ; 0 %], correspondant à l'absence totale de tamisats sur le plus petit tamis (0.08 mm).
- B. Le point d'extrémité **B** se situe sur le tamis correspondant à la dimension maximale du gravier **D**, avec 100 % de tamisats, soit les coordonnées [D ; 100 %].
- C. Quant au point de brisure **A**, il se situe :
  - ✚ à  $D/2$  si  $D \leq 20$  mm,
  - ✚ au milieu de l'intervalle [5 mm ; D] si  $D > 20$  mm.

La détermination de l'ordonnée (le pourcentage de tamisats) du point A dépend des proportions du mélange, lesquelles influent directement sur la compacité du béton, et donc sur ses performances mécaniques. Ainsi, l'optimisation de cette position est cruciale pour obtenir une compacité maximale, ce qui est précisément l'objectif de la méthode de formulation dite **DREUX-GORISSE**.

L'ordonnée optimisée du point de brisure, notée  $Y_A$ , est calculée à l'aide de la relation suivante :

$$Y_A = 50 - \sqrt{D + K + K_s + K_p}$$

Cette formule permet d'évaluer la position optimale du point A sur la courbe granulaire de référence, en intégrant plusieurs paramètres influençant la compacité du béton et sa facilité de mise en œuvre. Les termes sont définis comme suit :

- **D** : dimension maximale du granulat.
- **K** : coefficient correcteur représentant l'optimisation de la compacité. Il dépend principalement du type de vibration utilisée, de la forme des granulats (roulés ou concassés), ainsi que du dosage en ciment. Ce coefficient est généralement obtenu à partir d'un tableau de référence.
- **K<sub>s</sub>** : terme d'ajustement de la granularité du sable.
- **K<sub>p</sub>** : terme correctif additionnel utilisé lorsque la mise en œuvre du béton est effectuée par pompage, afin de compenser les pertes de compacité liées à ce procédé.

Cette équation permet ainsi d'optimiser la courbe granulaire théorique en tenant compte des principaux facteurs pratiques qui influencent la maniabilité et la densité du béton.

La valeur trouvées **K=+2**

On a MF= 3.60 → **K<sub>s</sub>= 0**

**K<sub>p</sub>**, ajustement du dosage en sable pour faciliter le transfert par pompes à béton **K<sub>p</sub>=0** si le béton est non pompable **5 ≤ K<sub>p</sub> ≤ 10** si le béton est pompable

On a un béton non pompable. Donc : **K<sub>p</sub>=0**

Pour un béton non pompable réalisé avec des granulats roulés dont le gravier a un diamètre, D=8mm, le sable a un module de finesse MF=3.60, un dosage en ciment de 350 kg

$$K=2, K_p=0, Y_A = 50 - \sqrt{16+2+6+0} = 54\%$$

**X<sub>A</sub> = 16/2 = 8 mm** le point A à pour coordonnées : **A[8;54]**.

### La ligne de partage :

La ligne de partage est une droite tracée entre deux points caractéristiques des courbes granulométriques : elle relie le point situé à 95 % de tamisât sur la courbe des granulats les plus fins (généralement le sable), au point situé à 5 % de tamisât sur la courbe des granulats les plus gros (généralement le gravier). Le point d'intersection de cette ligne avec la courbe granulaire théorique du mélange optimal permet de déterminer les proportions en pourcentage de volume absolu de sable et de gravier. Ces proportions sont obtenues en lisant le pourcentage de tamisât correspondant à ce point d'intersection. Cette méthode permet d'optimiser la composition granulaire du béton afin d'atteindre une compacité maximale et une meilleure performance mécanique.

Ce pourcentage indique la proportion de sable, le complément donne la proportion de gravier. Le mélange optimal est obtenu avec un volume absolu de 39 % de sable, 13 % de gravier 3/8 et 48 % de gravier 8/16.

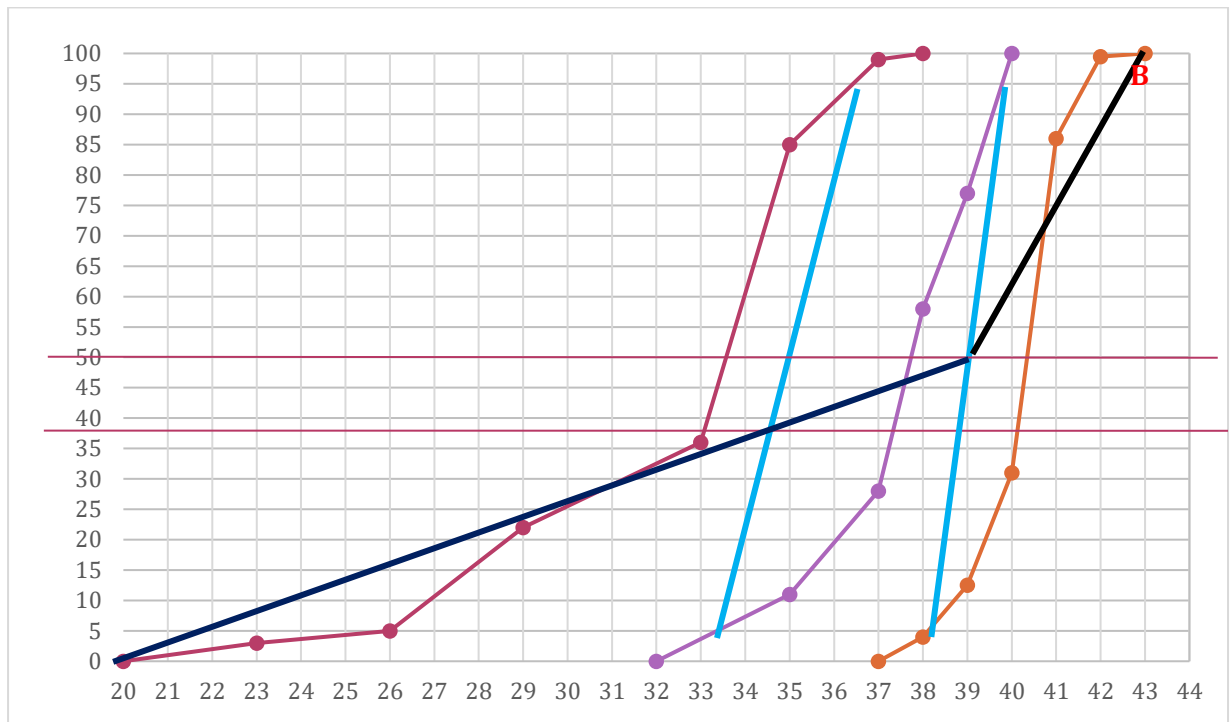


Figure 4-9: Les lignes de partage

#### Dosage en masse des granulats :

La détermination du dosage en masse des granulats repose sur la connaissance de la compacité du béton ainsi que des masses volumiques absolues des matériaux utilisés. La compacité optimale est atteinte en respectant les proportions adéquates du mélange granulaire. Toutefois, cette compacité ne dépend pas uniquement de ces proportions, mais également du diamètre maximal **D** des granulats, des conditions de vibration lors de la mise en œuvre et du degré de plasticité du béton. L'expérience permet d'estimer approximativement la compacité du béton à partir des valeurs indiquées dans le tableau suivant.

#### Coefficient de compacité :

- La correction effectuée, on trouve  $\gamma = 0.819$ . Ces valeurs sont convenables pour des granulats roulés sinon il conviendra d'apporter la correction suivante :

Sable roulé et gravier concassé = **-0.01**

Sable et gravier concassé = **-0.03**

Alors :  $\gamma = 0.819 - 0.01 = 0.745$

Toutes les masses des constituants du béton ont été déterminées afin d'obtenir un béton conforme aux exigences souhaitées. Il est désormais nécessaire de réaliser des

éprouvettes pour vérifier et ajuster les dosages de manière expérimentale, dans le but de garantir la qualité finale du béton.

**Quantités des agrégats en pourcentage :**

Sable concassée (%)=39% S/100=0.39

Gravier 3/8 (%)= 13% Gravier(3/8)/100=0.48

Gravier 8/16 (%)= 54% Gravier(8/16)/100=0.54

**Volume absolu de l'ensemble des granulats :**

On a :  $V=(1000 \times \gamma) - c$   
 $c=C/3.10=112.90$

Volume absolu de l'ensemble des granulats  $V=(1000 \times \gamma) - c$   
 $= (1000 \times 0.809) - 112.90$   
 $= 696.1L$

**Dosage des granulats en kg dans 1 m<sup>3</sup> :**

Sable concassée [kg]=0.39x696.1=271.47

Gravier 3/8 [kg]=0.13x696.1=90.49

Gravier 8/16 [kg]= 0.48x696.1=334.12

**Les masses spécifiques sont :**

Sable=2.79 g/cm<sup>3</sup>

Gravier (3/8)=2.65 g/cm<sup>3</sup>

Gravier (8/16)= 2.66g/cm<sup>3</sup>

**Les dosages en matériaux secs pour notre micro béton seront donc :**

<b>Ciment</b>	<b>350kg/m<sup>3</sup>.</b>
<b>Sable</b>	<b>2.79 × 271.47=757.4kg/m<sup>3</sup></b>
<b>Gravier (3/8)</b>	<b>2.65 × 90.49=239.7kg/m<sup>3</sup></b>
<b>Gravier (8/16)</b>	<b>2.66×334.12 =888.75kg/m<sup>3</sup></b>
<b>au total</b>	<b>2078.25kg/m<sup>3</sup></b>

En plus de cela, nous avons ajouté :

Déché de prique	8% et 15% (poids de ciment)
Adjuventsuperplastifiant	2% (poidsde ciment)

#### 4.6. Déchet de brique :

Les déchets de briques proviennent principalement des chantiers de démolition et peuvent être recyclés dans le béton comme substitut aux granulats naturels. Leur valorisation permet de réduire l'impact environnemental et d'encourager la construction durable. Toutefois, leur utilisation nécessite une analyse préalable de leurs propriétés physiques et mécaniques pour garantir la qualité du matériau final.

Le brique recyclé a été broyé ensuite tamiser dans un tamis 0.16 mm. Il a été utilisé deux pourcentages comme addition par rapport au poids de ciment : 8 et 15 %.



Figure 4-10 : déchets de briques

#### 4.7. Matériels et essais :

##### L'exécution du malaxage :

Le malaxage a pour but d'assurer une répartition homogène des différents constituants du béton grâce à l'action mécanique des outils de brassage. Une maîtrise rigoureuse du dosage des composants est essentielle pour garantir la constance et l'homogénéité du béton obtenu.

La préparation du béton est réalisée à l'aide d'un malaxeur. Les étapes de fabrication se déroulent comme suit : on commence par introduire la quantité de gravier, suivie de celle du sable, puis on met en marche le malaxeur pour effectuer le malaxage

initial des granulats. Ensuite, on ajoute le ciment, puis l'eau. Le malaxage complet dure environ 35 secondes. À la fin de cette durée, le malaxeur est arrêté et un essai d'affaissement au cône d'Abrams est effectué afin d'évaluer la consistance du béton préparé.

### **Malaxage du béton :**

Il est fondamental que les constituants de base du béton (ciment, sable, gravier et eau) soient mélangés de manière appropriée afin d'obtenir un béton frais dont tous les granulats sont correctement enrobés par la pâte de ciment. Ce mélange homogène garantit une répartition uniforme des composants, ce qui confère au béton des propriétés mécaniques constantes et fiables à grande échelle. Le malaxage peut être réalisé manuellement ou à l'aide de malaxeurs mécaniques. Dans le cadre de notre étude, le malaxage a été effectué à l'aide d'un malaxeur.

### **Malaxeurs à béton :**

Selon la norme [NA EN 12390-2], les malaxeurs à béton doivent être capables de mélanger les constituants de manière uniforme afin d'assurer une homogénéité parfaite du béton. De plus, ils doivent permettre le déchargement du béton sans en altérer l'uniformité. Ces appareils jouent un rôle déterminant dans la qualité finale du béton produit.



**Figure 4-11:** Le malaxeur utilisé (malaxeur de laboratoire Géo-matériaux).

### **Mesure de la consistance (selon la norme NFP 18-415) :**

La consistance du béton frais est évaluée à l'aide de l'essai d'affaissement au cône d'Abrams. Cet essai consiste à remplir un moule conique en trois couches

successives, chacune étant compactée par 25 coups de tige métallique de 16 mm de diamètre. Une fois le cône rempli, il est retiré délicatement à la verticale, et l'on mesure la hauteur de l'affaissement du béton en centimètres pour déterminer son ouvrabilité.

**Tableau 4-16:** Classement des bétons selon la valeur d'affaissement au cône d'Abrams.

Classe de consistance	Affaissement	Consistance
S1	10 à 40 mm	Ferme
S2	50 à 90 mm	Plastique
S3	100 à 150 mm	Très plastique
S4	160 à 210 mm	Fluide
S5	≥ 220 mm	Très fluide



**Figure 4-12 :** L'affaissement de cône d'Abrams d'un béton.

**Vibration : [NAEN 12390-2] :**

La vibration est une méthode courante de compactage du béton frais, dont l'efficacité dépend de la fréquence, de l'amplitude et de la durée. Dans cette étude, les éprouvettes ont été vibrées pendant 20 secondes à l'aide d'une table vibrante. Après 24 heures à l'air libre en laboratoire, elles ont été démoulées, marquées, puis conservées soit dans l'eau soit à l'air libre, selon les conditions de mûrissement choisies.



**Figure 4-13:** la table vibrante

**Conduite des essais de température et humidité :**

Après le décoffrage, les éprouvettes prismatiques en béton de dimensions  $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$  ont été pesées avant d'être placées pendant sept jours dans un appareil permettant d'avoir une température de  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  avec une humidité de 90%, après 7 jours, les échantillons ont été placés dans l'eau pendant 21 jours



**Figure 4-14 :** Appareil de température et d'humidité

**Essai de compression :**

L'appareil d'essai de compression est utilisé pour évaluer le comportement des matériaux lorsqu'ils sont soumis à une charge de compression croissante de manière

uniforme, jusqu'à la rupture de l'échantillon. Cet essai permet de déterminer la résistance mécanique du matériau face aux efforts de compression.



**Figure 4-15:** Machine d'essai de compression

**Porosité accessible à l'eau :**

Les essais de porosité ont été réalisés conformément à la norme NF EN 18-459. L'objectif est de mesurer le pourcentage de vides connectés dans la matrice du béton permettant le passage de l'eau. Le principe repose sur une série de pesées (à sec, saturée et hydrostatique). Après séchage des éprouvettes à 105°C jusqu'à masse constante (variation inférieure à 0,05 % entre deux pesées successives), la porosité accessible est calculée en fonction de ces pesées selon la formule normalisée.

$$PM(\%) = [(M1 - M2) / (M1 - M3)] \times 100$$

Avec :

M1 : masse humide à l'air

M2 : masse sèche

M3 : masse hydrostatique



**Figure 4-16:** Pesée hydrostatique et l'appareille pour chauffer(ébullition)du béton

**Essai d'auscultation sonore (essai ultrasonique) :**

L'essai ultrasonique a été réalisé conformément à la norme NF EN 12504-4. Il consiste à émettre une onde ultrasonore à travers une éprouvette en béton et à mesurer le temps de transit de cette onde sur une distance connue. La vitesse de propagation permet ensuite de déduire, par corrélation graphique, la résistance à la compression du béton. Cet essai non destructif est couramment utilisé pour évaluer la qualité et l'homogénéité du matériau.



**Figure 4-17:** l'appareille d'essai ultrasonique

**4.8. Essai mouillage – séchage (ASTM D559 – 57) :**

L'essai de mouillage séchage se définit comme une suite alternative d'une période de mouillage à 20°C (dans l'eau) pendant 5 heures et d'une période de séchage à l'étuve à 71°C pendant 42 heures. Pour chaque mortier, nous avons noté les pertes en poids après les douze cycles de vieillissement.

**1 cycle= 5 heures dans l'eau à 20°C ensuite 42 heures de séchage à l'étuve à 71°C.**

**4.9. Représentation et interprétation des résultats :**

**Introduction :**

Ce chapitre est consacré à l'étude du comportement du béton élaboré à partir de poudre de déchets de briques. Cette démarche s'inscrit dans une volonté de valorisation des matériaux recyclés en vue d'améliorer la durabilité et la performance des bétons modernes. Les travaux menés ont permis d'approfondir la compréhension des propriétés physiques et mécaniques de ce type de béton, en mettant en évidence l'impact des proportions de poudre de brique sur son comportement global.

Les essais ont été réalisés sur des échantillons conservés dans différents environnements de cure, à savoir l'air, l'eau et à 40°C avec des dosages en poudre de brique variant entre 0% ;8 % et 15 %. L'ensemble des résultats obtenus est présenté dans ce chapitre et vise à évaluer l'influence de ces paramètres sur les performances du matériau. Les tests réalisés sont :

- ✓ Résistance à la compression
- ✓ Porosité accessible à l'eau
- ✓ Résistance à la compression (Après séchage/ mouillage)

**Représentation et analyse des résultats :**

**1. Résistance à la compression :**

Pour déterminer la résistance à la compression, des éprouvettes prismatiques de dimensions 10×10×10 cm ont été préparées. Les essais ont été réalisés à l'aide d'une presse hydraulique, en respectant scrupuleusement les procédures techniques suivantes :

- ↳ L'éprouvette est placée avec précision au centre du plateau de la presse.
- ↳ Aucune matière ne doit être interposée entre l'éprouvette et les plateaux de la presse.
- ↳ La charge est appliquée de manière continue et régulière jusqu'à la rupture de l'éprouvette.

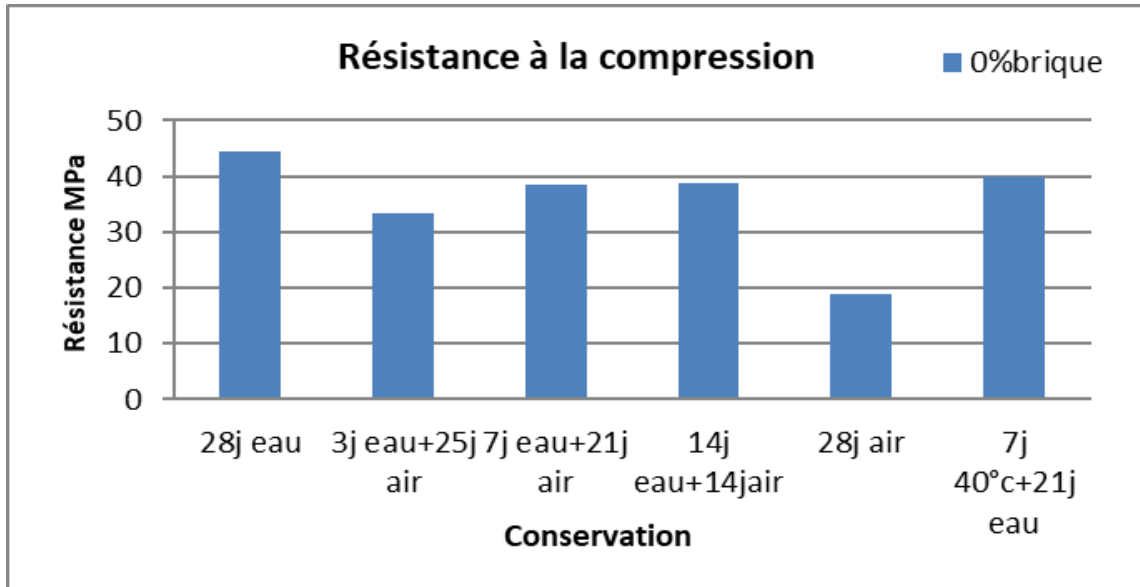


Figure 4-18: Résistance à la compression ( 0% de poudre de brique)

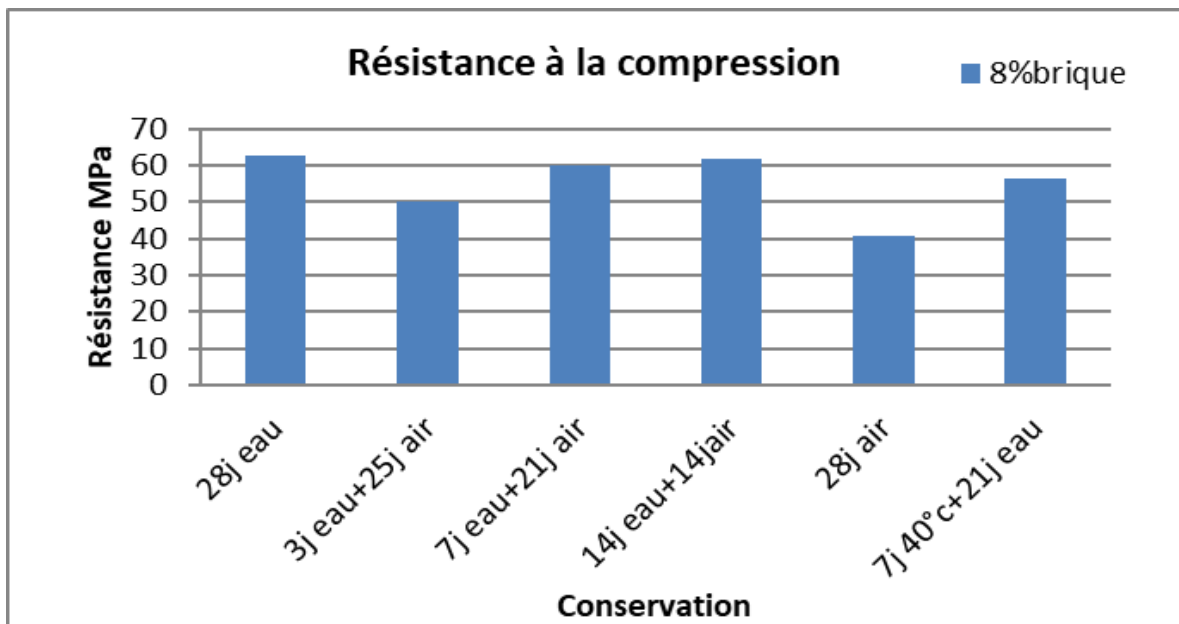


Figure 4-19: Résistance à la compression ( 8% de poudre de brique )

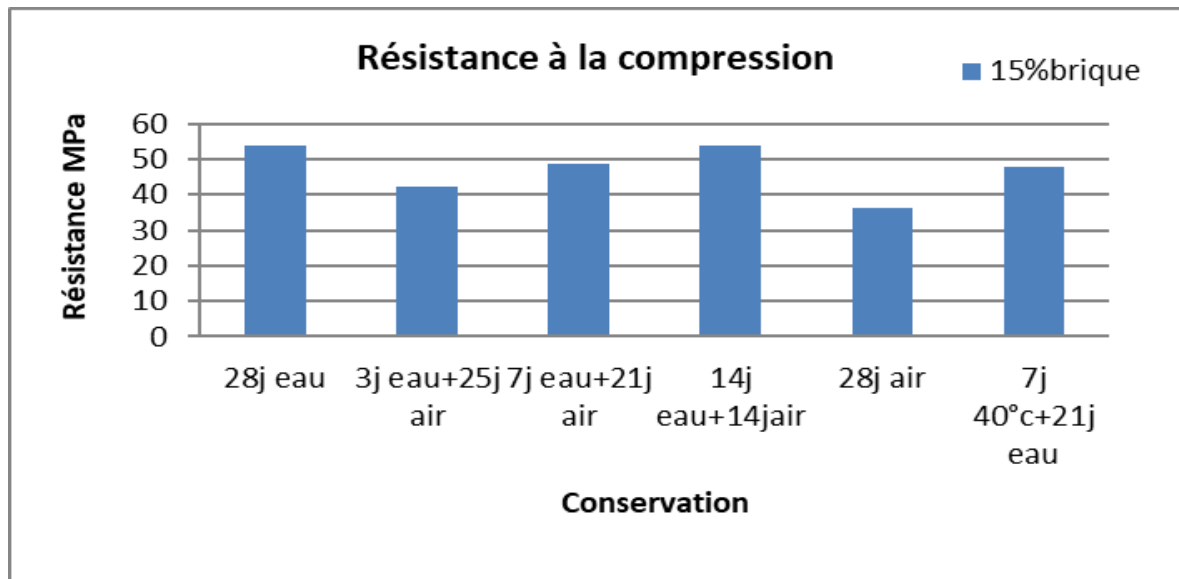


Figure 4-20: Résistance à la compression ( 15% de poudre de brique )

**Commentaire :**

La résistance à la compression du béton avec 0 % de résidus de brique sous différentes conditions de conservation. On peut observer les points suivants :

- **28 jours dans l'eau** : la résistance la plus élevée (~45 MPa), ce qui indique que la cure continue en eau favorise fortement le développement des propriétés mécaniques du béton.
- **3 jours dans l'eau + 25 jours à l'air** : diminution notable de la résistance (~33 MPa), suggérant qu'un passage précoce au séchage à l'air réduit l'efficacité du durcissement.
- **7 jours dans l'eau + 21 jours à l'air** : légère amélioration (~38 MPa) par rapport à la condition précédente, montrant que l'allongement de la période de cure humide améliore les performances.
- **14 jours dans l'eau + 14 jours à l'air** : résultats similaires à la condition précédente (~38 MPa), confirmant l'importance de la cure humide initiale.
- **28 jours à l'air** : la résistance la plus faible (~20 MPa), prouvant que l'absence de cure humide nuit considérablement à la résistance du béton.
- **7 jours à 40 °C suivis de 21 jours dans l'eau** : résistance élevée (~40 MPa), indiquant qu'un traitement thermique précoce peut être efficace s'il est suivi d'une cure humide adéquate.

Ce graphique représente la résistance à la compression d'un béton contenant 8 % de poudre de brique, sous différentes conditions de conservation. On observe les points suivants :

- **28 jours dans l'eau** : résistance la plus élevée (~63 MPa), ce qui démontre que la cure continue en immersion favorise fortement le développement de la résistance du béton, même en présence de poudre de brique.

- **14 jours dans l'eau + 14 jours à l'air** : résistance très élevée (~61 MPa), très proche de celle obtenue avec une cure complète en eau, ce qui souligne l'efficacité d'une cure partielle humide.
- **7 jours dans l'eau + 21 jours à l'air** : bonne résistance (~54 MPa), supérieure à celle des cures de durée humide plus courte.
- **3 jours dans l'eau + 25 jours à l'air** : baisse notable (~49 MPa), indiquant qu'une cure humide de courte durée est insuffisante.
- **28 jours à l'air** : résistance la plus faible (~38 MPa), confirmant que l'absence de cure humide pendant la période de durcissement affaiblit considérablement le béton.
- **7 jours à 40 °C suivis de 21 jours dans l'eau** : résistance élevée (~56 MPa), montrant que la cure thermique précoce suivie d'une immersion en eau peut améliorer efficacement la résistance

La résistance à la compression d'un béton contenant 15 % de poudre de brique, sous différentes conditions de conservation. L'analyse des résultats permet de dégager les observations suivantes :

- **28 jours dans l'eau** : résistance maximale enregistrée (~55 MPa), ce qui confirme que la cure prolongée en immersion reste la plus efficace, même avec un taux relativement élevé de poudre de brique.
- **14 jours dans l'eau + 14 jours à l'air** : résistance très satisfaisante (~53 MPa), proche de celle obtenue avec une cure complète en eau, ce qui démontre l'efficacité de ce mode de cure mixte à assurer une bonne hydratation.
- **7 jours dans l'eau + 21 jours à l'air** : résistance modérée (~48 MPa), indiquant qu'une durée réduite de cure humide affecte négativement le développement de la résistance.
- **7 jours à 40 °C suivis de 21 jours dans l'eau** : résistance correcte (~47 MPa), ce qui montre que la cure thermique précoce suivie d'une immersion peut donner de bons résultats, mais reste moins performante que la cure entièrement humide.
- **3 jours dans l'eau + 25 jours à l'air** : baisse significative de la résistance (~43 MPa), ce qui souligne que trois jours de cure humide sont insuffisants pour garantir une hydratation efficace.
- **28 jours à l'air** : résistance la plus faible enregistrée (~36 MPa), confirmant une fois de plus que l'absence de cure humide nuit gravement au développement des propriétés mécaniques.

2. porosité accessible à l'eau :

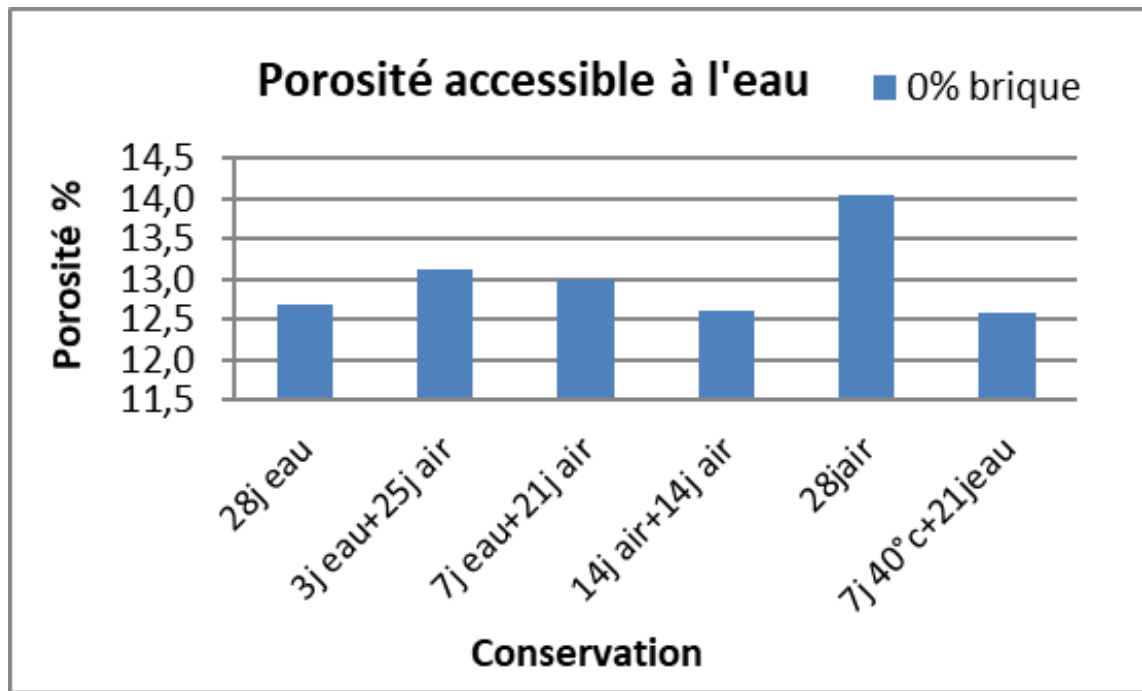


Figure 4-21: Porosité accessible à l'eau ( 0% de poudre de brique )

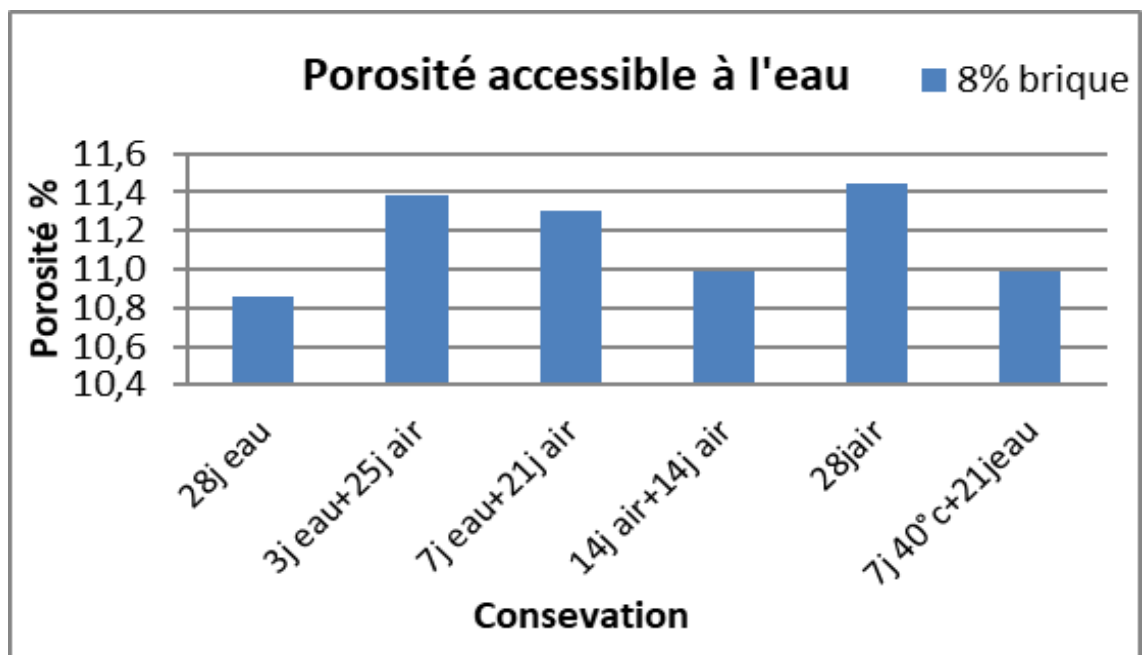


Figure 4-22: Porosité accessible à l'eau ( 8% de poudre de brique )

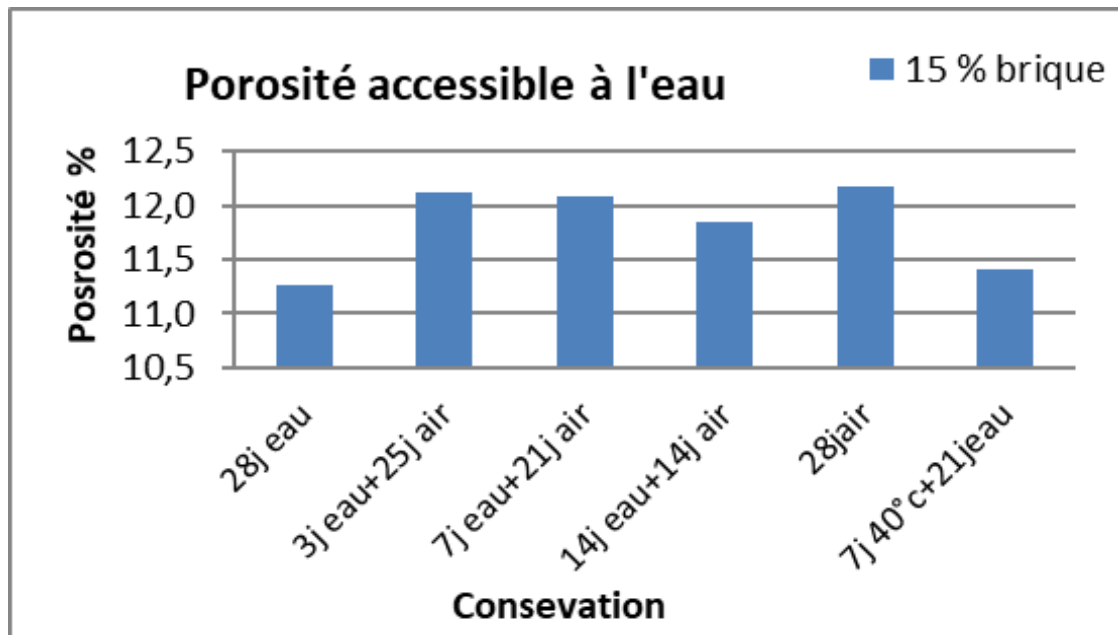


Figure 4-23: Porosité accessible à l'eau ( 15% de poudre de brique )

**Commentaire :**

Ce graphique illustre l'évolution de la porosité accessible à l'eau pour un béton sans ajout de poudre de brique (0 % brique) soumis à différentes conditions de conservation. L'analyse des résultats permet de tirer les observations suivantes :

- **28 jours dans l'eau** : Le taux de porosité le plus bas (~12,8 %) a été enregistré, ce qui indique que la cure continue en immersion améliore la densité du béton et réduit les vides accessibles à l'eau.
- **3 j eau + 25 j air, 7 j eau + 21 j air et 14 j air + 14 j air** : Ces conditions présentent des niveaux de porosité similaires (~13,2–13,3 %), montrant qu'une cure partielle ou un séchage trop précoce à l'air augmente la porosité et dégrade la compacité du matériau.
- **28 jours à l'air** : Le taux de porosité le plus élevé (~14,2 %) a été relevé, ce qui confirme que l'absence de cure humide favorise la formation de pores et nuit à la qualité du béton.
- **7 jours à 40°C suivis de 21 jours dans l'eau** : Une porosité relativement faible (~12,9 %) a été mesurée, ce qui montre que la combinaison d'un traitement thermique initial suivi d'une cure humide permet d'obtenir une microstructure dense et performante

Ce graphique représente l'évolution de la porosité accessible à l'eau pour un béton contenant 8% de poudre de brique, selon différentes conditions de conservation. L'analyse des données permet de tirer les observations suivantes :

- **28 jours dans l'eau** : La porosité la plus faible (~10,8 %) est enregistrée, ce qui indique que la cure continue à l'eau contribue à réduire les vides et à améliorer la structure du béton, même en présence de poudre de brique.
- **3 jours d'eau + 25 jours d'air, 7 jours d'eau + 21 jours d'air et 14 jours d'air + 14 jours d'air** : Une porosité relativement élevée (entre ~11,2 % et 11,3 %) est observée, ce qui confirme que le passage précoce à un séchage à l'air augmente la porosité et compromet l'hydratation complète du ciment.
- **28 jours à l'air** : La porosité la plus élevée (~11,4 %) est notée, ce qui démontre que l'absence de cure humide nuit à la densité du béton et augmente sa perméabilité.
- **7 jours à 40 °C suivis de 21 jours dans l'eau** : Une porosité relativement faible (~10,9 %) est obtenue, ce qui indique que le traitement thermique initial, suivi d'une cure à l'eau suffisante, peut être efficace pour réduire la porosité

Ce graphique illustre l'évolution de la porosité accessible à l'eau dans un béton contenant 15 % de poudre de brique recyclée, selon différentes conditions de conservation. L'analyse montre :

- **28 jours dans l'eau** : La porosité la plus faible (~11,2 %), indiquant qu'une cure prolongée à l'eau favorise la densification de la matrice cimentaire, même avec un taux élevé de poudre de brique.
- **3 jours eau + 25 jours air et 7 jours eau + 21 jours air** : Une porosité élevée (~12,1 %), ce qui suggère qu'un passage précoce à l'air empêche l'hydratation complète et augmente les vides capillaires.
- **14 jours eau + 14 jours air** : Une porosité modérée (~11,8 %), meilleure que les cas à cure aqueuse courte, ce qui confirme l'effet bénéfique d'une cure partiellement prolongé.
- **28 jours à l'air** : La porosité la plus élevée (~12,2 %), ce qui reflète l'effet négatif de l'absence totale de cure humide sur la structure du béton.
- **7 jours à 40°C puis 21 jours dans l'eau** : Une porosité relativement basse (~11,3 %), ce qui montre que la cure thermique initial, suivi d'une cure humide, peut être efficace.

3. Résistance à la compression (Après séchage/ mouillage) :

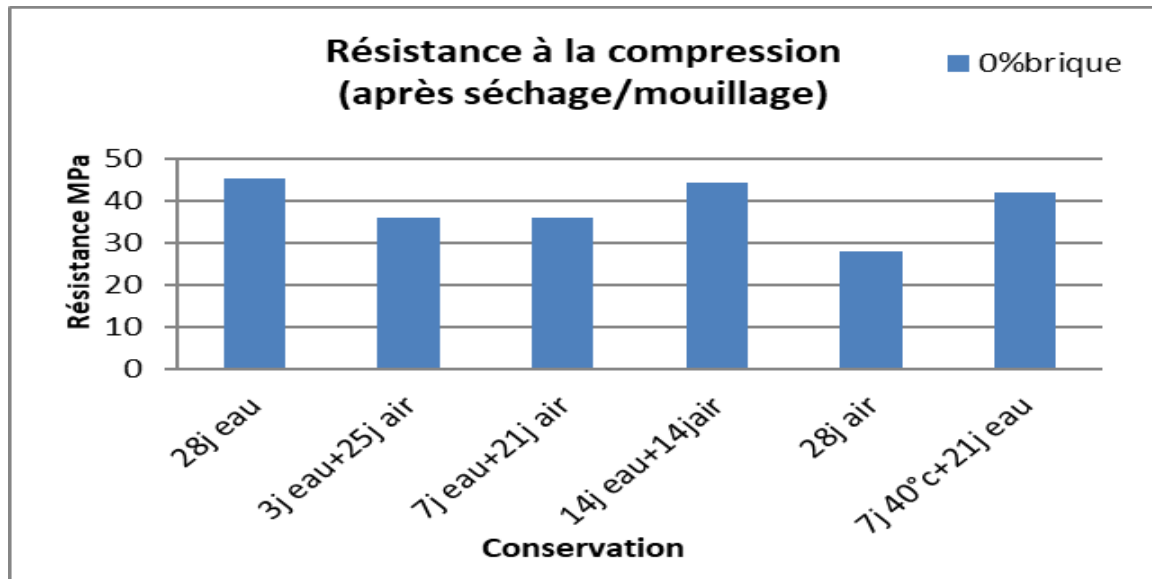


Figure 4-24: Résistance à la compression poudre de brique 0%(Après séchage/ mouillage)

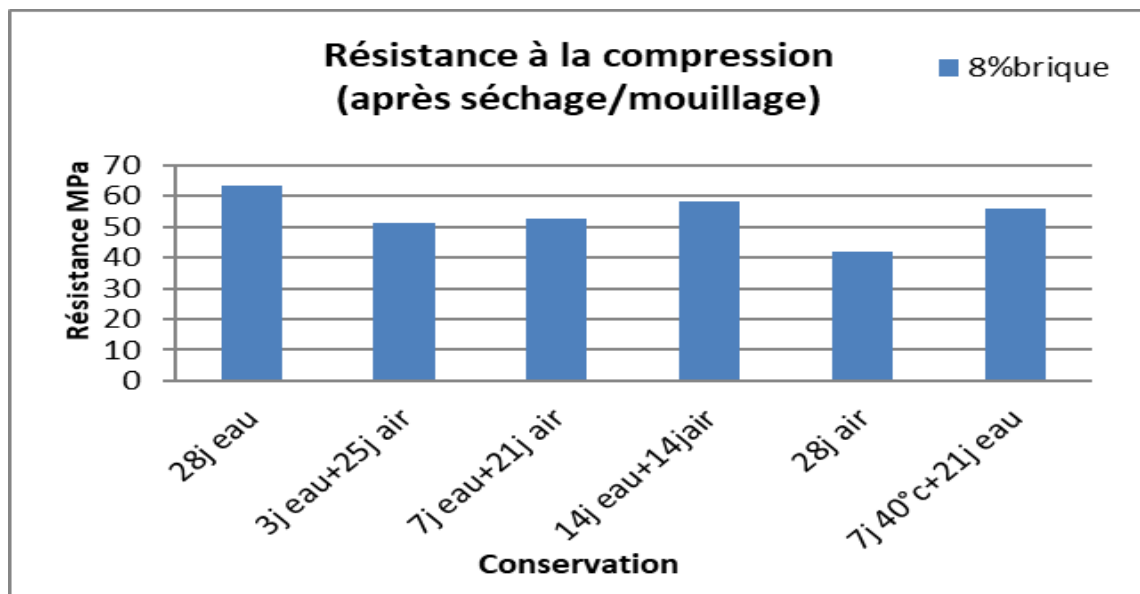


Figure 4-25: Résistance à la compression poudre de brique 8 % (Après séchage/ mouillage)

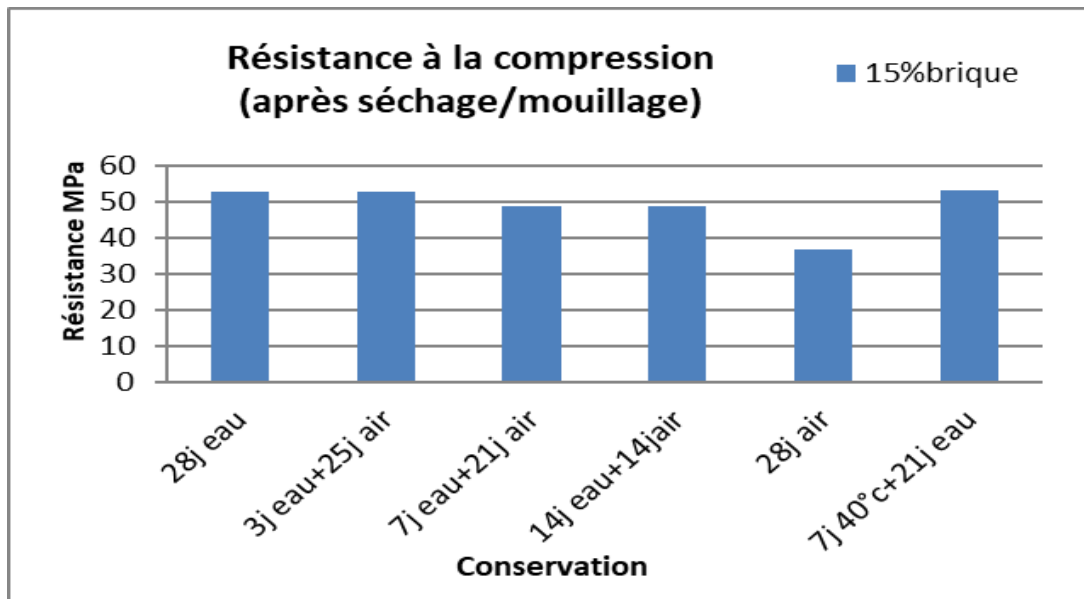


Figure 4-26: Résistance à la compression poudre de brique 15 % (Après séchage/ mouillage)

**Commentaire :**

Le graphique montre l'effet des différentes conditions de cure sur la résistance à la compression après un cycle de séchage et de mouillage pour un béton sans poudre de brique (0 % brique). Voici les observations principales :

- **28 jours dans l'eau** : La résistance la plus élevée (~47 MPa), indiquant que la cure continue en eau permet un excellent développement des performances mécaniques, même après exposition à des cycles d'humidité.
- **14j eau + 14j air** : Résistance élevée (~44 MPa), proche de celle de la cure complète en eau, ce qui montre qu'une période initiale suffisante de cure humide est bénéfique.
- **3j eau + 25j air** et **7j eau + 21j air** : Résistances plus faibles (~35-37 MPa), indiquant qu'une durée réduite de cure humide entraîne une perte de performance.
- **28j air** : Résistance la plus basse (~28 MPa), ce qui met clairement en évidence l'effet négatif d'une absence totale de cure humide, surtout après un cycle de séchage/mouillage.
- **7j à 40°C + 21j eau** : Résistance intermédiaire (~36 MPa), meilleure que la cure à l'air seul, mais inférieure à la cure en eau, ce qui suggère que la température élevée initiale peut avoir un effet négatif si elle n'est pas suivie d'une cure humide adéquate.

Le graphique illustre l'effet des conditions de conservation sur la résistance à la compression après séchage/mouillage pour un béton contenant 8 % de poudre de brique. Voici les principales observations :

- **28 jours dans l'eau** : La résistance maximale (~63 MPa) est obtenue avec une cure continue en eau, confirmant que l'hydratation optimale améliore considérablement les performances mécaniques même en présence d'additions minérales.
- **14j eau + 14j air** : Résistance élevée (~58 MPa), proche de celle du béton immergé 28 jours, ce qui démontre l'efficacité d'une cure initiale en eau suffisante.
- **7j eau + 21j air et 3j eau + 25j air** : Résistances intermédiaires (~52-53 MPa), en baisse par rapport aux conditions de cure plus humides, ce qui montre que raccourcir la période de cure en eau impacte négativement la résistance.
- **7j à 40°C + 21j eau** : Résistance correcte (~50 MPa), mais inférieure aux conditions optimales, suggérant que l'effet de la température élevée est partiellement compensé par la cure en eau ultérieure.
- **28j air** : Résistance la plus faible (~42 MPa), illustrant la détérioration importante des propriétés mécaniques en l'absence de cure humide.

Le graphique présente l'évolution de la résistance à la compression après séchage/mouillage pour un béton contenant 15 % de poudre de brique, en fonction de différentes conditions de conservation.

- **28 jours dans l'eau** : Cette condition montre la résistance maximale (~53 MPa), ce qui confirme l'importance d'une cure continue en milieu humide pour optimiser les performances mécaniques, même avec une teneur élevée en addition minérale.
- **3j eau + 25j air** : Une résistance légèrement inférieure (~51 MPa), indiquant qu'une cure en eau très courte est insuffisante pour assurer un développement optimal de la microstructure.
- **7j eau + 21j air et 14j eau + 14j air** : Résistances comparables (~49 MPa), soulignant que même une cure modérée améliore les propriétés par rapport à un séchage direct, mais reste inférieure à la cure continue.
- **7j à 40°C + 21j eau** : Résistance (~45 MPa) modérément affectée par l'exposition initiale à haute température, mais partiellement compensée par la cure humide qui suit.
- **28 jours à l'air** : Montre la résistance la plus faible (~40 MPa), ce qui illustre l'impact négatif d'un durcissement en milieu sec, en particulier avec une teneur élevée en poudre de brique.

*Conclusion*

*Générale*

## *Conclusion Générale*

L'ensemble des résultats expérimentaux met en évidence l'impact déterminant des conditions de cure sur les propriétés mécaniques et la microstructure des bétons, qu'ils soient formulés avec ou sans ajout de poudre de brique recyclée. Il ressort de manière claire et cohérente que la cure humide continue, notamment l'immersion durant 28 jours, constitue la méthode la plus efficace pour assurer un développement optimal de la résistance à la compression et une réduction significative de la porosité accessible à l'eau.

À l'inverse, une conservation prolongée à l'air, sans cure humide préalable, entraîne systématiquement une diminution notable des performances mécaniques et une augmentation de la porosité, traduisant une hydratation incomplète de la matrice cimentaire. Cette observation est valable quel que soit le pourcentage de substitution en poudre de brique.

L'intégration de poudre de brique, jusqu'à des taux de 15 %, a démontré que, bien qu'elle puisse induire une légère baisse des performances en comparaison au béton témoin, une cure adéquate permet de conserver des niveaux de résistance et de durabilité satisfaisants. En particulier, les cures mixtes (eau suivie d'air) sur 14 ou 21 jours offrent des compromis intéressants, notamment en termes de faisabilité sur le chantier.

Par ailleurs, les protocoles de cure combinant un traitement thermique initial (à 40 °C) suivi d'une immersion en eau ont montré un potentiel d'amélioration, bien que leurs performances restent généralement inférieures à celles obtenues par une cure humide complète.

Ainsi, cette étude souligne l'importance cruciale du contrôle des conditions de cure dans l'optimisation des performances du béton, en particulier lorsqu'il contient des additions minérales comme la poudre de brique recyclée. Ces résultats confortent la viabilité de l'intégration de matériaux recyclés dans la formulation du béton, à condition de garantir des conditions de durcissement rigoureusement maîtrisées.

## Références

- [1] <https://www.vicat.fr/nos-solutions/nos-expertises/ciment>
- [2] <https://www.toutsurlebeton.fr/le-ba-ba-du-beton/le-ciment-composition-et-fabrication/>
- [3] CHIHAOUI Ramdane; *Durabilité des matériaux cimentaires vis-à-vis d'un environnement chimiquement agressif*, Mémoire de Magister, USTMB d'Oran, 2008.
- [4] L. PLISKIN; *La fabrication du ciment*; Édition Eyrolles, p. 217, Paris, 1993.
- [5] <http://doc.lerm.fr/lhydratation-du-ciment-portland/>
- [6] Jean P. Mercier, Gérald Zambelli, Wilfried Kurz; *Introduction à la science des matériaux*; PPUR Presses Polytechniques, p. 127, 1999.
- [7] Université de Sherbrooke, GCI714 – *Durabilité et réparations du béton*, Chapitre 2.
- [8] A. Vichot, J.P. Olivier; *La durabilité des bétons*, Presses ENPC, 2008. ISBN 978-2-85978-34-8.
- [9] *Concrete structure, properties, and materials*, Prentice-Hall, p. 450, 1986.
- [10] Dreux G.; *Nouveau guide du béton*, Édition Eyrolles, Paris, 1979, 201 p.
- [11] Neville A.M., Brooks J.J.; *Concrete Technology*, Pearson Education Limited, 2010. ISBN 978-0273732198.
- [12] Mehta P.K., Monteiro P.J.M.; *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials* (4<sup>e</sup> éd.), McGraw-Hill Education, 2013.
- [13] Slag Cement Association; *Slag cement: concrete time of set, reducing thermal stress in mass concrete*, 2002.
- [14] Neville A.M.; *Propriétés des bétons*, Édition Eyrolles, Paris, 2000.
- [15] P. Lawrence; *Sur l'activité des cendres volantes et des additions minérales chimiquement inertes dans les matériaux cimentaires*, Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier (Toulouse III), 2000.
- [16] F. De Larrard, A. Belloc; *L'influence du granulats sur la résistance à la compression des bétons*, Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées n° 219, janv-fév 1999, pp. 41–52.
- [17] Kaouane Malika; *Mémoire de Magister – Analyse des contraintes mécaniques et de la fissuration des éléments en béton armé sous l'effet thermo-mécanique*, Université Mouloud Mammeri (Tizi-Ouzou), 2011.
- [18] M. Venuat; *La pratique des ciments, mortiers et bétons*, Tome 1, 2<sup>e</sup> édition, Collection Moniteur, 1989.
- [19] S.Y.N.G.-F. Chan, J.K.W. Peng Chan; *Comparison between high strength concrete and normal strength concrete subjected to high temperature*, *Materials and Structures*, vol. 29, pp. 616–619, 1996.
- [20] Neville A.M.; *Test on the strength of high-alumina cement concrete*, *Journal of the New Zealand Institute*, 1959, 14(3), pp. 73–77.
- [21] Alexander K.M., Ivanusec I.; *Long-term effects of cement SO<sub>3</sub> content on the properties of normal and high-strength concrete, Part I. The effect on strength*, *Cement and Concrete Research*, 1982, 12(1), pp. 51–60.
- [22] Kakizaki M., Edahiro H., Tochigi T., Niki T.; *Effect of mixing method on mechanical properties and pore structure of ultra high-strength concrete*, Katri Report n° 90, Tokyo, 1992.
- [23] Nielsen L.F.; *Strength development in hardened cement paste: examination of some empirical equations*, *Materials and Structures*, 1993, 26(159), pp. 255–260.
- [24] Ollivier J.P., Buil M.; *Conception des bétons: la structure poreuse, la durabilité des bétons*, Presses de l'ENPC, Paris, 1992.
- [25] Chanvillard G.; *Connaissances générales sur le matériau béton*, Presses de l'ENPC, Lyon, 1999.
- [26] Bazant Z.P., Kaplan M.; *Concrete at high temperature: material behaviour and*

- mathematical modelling*, Longman, 1996, 412 p.
- [27] Z. Gammouda; *Effet de plasmas des ions d'argon (Ar<sup>+</sup>) sur l'interaction entre des couches minces réfractaires et des substrats en acier*, Mémoire de Magister, Université K.M. Ouargla, 2010.
- [28] <http://www.arabency.com> (version du 17 mai 2012)
- [29] Dreux G., Festa J.; *Nouveau Guide du béton et de ses constituants*, Édition Eyrolles, 2002, 409 p.
- [30] Ferhat N.; *Influence de la variation des caractéristiques mécaniques sur le comportement des éléments en béton armé*, mémoire de Master, 2012, 81 p.
- [31] El Amiri A.; *Durability of concrete in hot climate*, Thèse de doctorat, University of Leeds (Angleterre), 1988.
- [32] Soroka I., Ravina D.; *Hot Weather Concreting with Admixtures, Cement and Concrete Composites*, vol. 20, 1998, pp. 129–136.
- [33] Mamillan, Minard et Zanghellini; *Bétonnage par temps chaud et par temps froid: connaissances actuelles et recommandations*, Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics n° 476, 1989, pp. 78–83.
- [34] Mouret M.; *Contribution à l'étude des phénomènes d'altération des résistances des bétons confectionnés par temps chaud*, Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, 1997.
- [35] AFNOR; NF P15.431: l'essai de Vicat, normes françaises, Paris, 1994.
- [36] Venuat M.; *La pratique des ciments, mortiers et bétons* (2<sup>e</sup> édition), tomes 1 et 2, Édition du Moniteur, 1989.
- [37] Ahmadi B.H.; *Initial and final setting time of concrete in hot weather, Materials and Structures & Matériaux et Constructions*, vol. 33, oct. 2000, pp. 511–514.
- [38] B. Benkhadda (2006); *Traitement naturel des mortiers et bétons destinés aux structures en béton préfabriqué: la cure*, pp. 24–27.
- [39] Byfors J. (1980); *Plain concrete at early ages*, Swedish Cement and Concrete Research Institute, CBI Research 3:80, Stockholm.
- [40] K. Tan & O.E. Gjorv (1996); *Performance of concrete under different curing conditions, Cement and Concrete Research*, 26(3), p. 355.
- [41] S.L. Mak & K. Torii (1995); *Strength development of high strength concretes with and without silica fume under the influence of high hydration temperatures, Cement and Concrete Research*, 25(8), p. 1791–1802.
- [42] ACC (Association Canadienne du Ciment); *Dosage et contrôle des mélanges de béton*, Canada, 2004, 355 p. (Référence EB101-07T).
- [43] Erik Niemann; *L'énergie grise dans la filière Bâtiment et Travaux Publics*, mission MGC/DRAST.
- [44] Centre d'Information sur le Ciment et ses Applications; *Cahier des modules de conférence pour les écoles d'architecture*, Paris-La-Défense CEDEX.
- [45] Z. Rahmouni, M. Belouadah, N. Tebbal; *Influence des additions minérales sur les propriétés à l'état durci des bétons ordinaires à base de matériaux locaux*, Université de M'sila (Algérie), 2012. (9 p.) Disponible via polytech Savoie.
- [46] *Chapitre IV: Les Bétons à Hautes Performances (BHP)*, DGM09/UMBB (2011–2012), 4 p. Disponible en ligne.
- [47] Berradia Mohammed; *Impact de l'ajout des fibres métalliques sur la résistance des structures en béton à haute performance*, Mémoire de Magistère, Université Hassiba Ben Bouali (Chlef), 2012.
- [48] P.C. Aïtcin; *Bétons Haute Performance*, Éditions Eyrolles, 2001.
- [49] F. De Larrard; *Structures granulaires et formulation des bétons*, traduit par Lecomte A., études et recherches des laboratoires des ponts et chaussées, Paris, 2000, 414 p.
- [50] *Guide d'application pratique de la nouvelle norme pour béton NF EN 206-1 sur chantier*, mars 2005.
- [51] F. Gorisse; *Essais et contrôle des bétons*, Éd. Eyrolles, 1978, p. 200.
- [52] A. Plassais; *Nanoporosité, texture et propriétés mécaniques de pâtes de ciments*, Thèse de doctorat, Université de Paris 6, 2003.

- [53] S. Diamond; *The microstructure of cement paste in concrete*, 8<sup>e</sup> congrès international de chimie du ciment, Rio de Janeiro, Brésil, vol. 1, p. 122–147, 1986.
- [54] G. Chanvillard; *Connaissances générales sur le matériau béton*, Éd. Aléas, 1999.
- [55] KHEMISSIR; *Caractérisation et choix d'une filière de traitement des déchets ménagers et assimilés de la ville d'Oran*, Thèse de Magister, Université d'Oran, 2014.
- [56] Mehdi C.; *Les déchets déchanter et le recyclage des matériaux dans le secteur du bâtiment*, Thèse de fin de formation, 2007.
- [57] STAMBOULI M.; *Valorisation de débris de verre dans les infrastructures routières: Application au verre industriel, verre ménager et verre mixte*, Mémoire de Master recherche, 2016.
- [58] CHELABI H., Taleb Z.; *Amélioration des propriétés mécaniques du plâtre de construction avec des déchets plastiques et verre*, Mémoire de Master, Université de Bouira, 2017.
- [59] Maela X., Xavier G.H., Christian M., Doris N.; *Lexique à l'usage des acteurs de la gestion des déchets*, Collection «Références» – SEEIDD/CGDD, mai 2012.
- [60] DIA Mouhamadou Bassirou & Soumah Mouloukou Souleymane; *État de l'art sur les bétons à base de recyclât: Perspectives pour l'Algérie*, Mémoire de Master, Université 8 Mai 1945 (Guelma).
- [61] Boufedah Badissi A.; *Influence de la granularité (classe granulaire 4/22.4) sur les caractéristiques des granulats et les propriétés des bétons ordinaires*, Thèse de Doctorat, Université de Mentouri (Constantine), 2011.
- [62] Saadani Sabrina; *Comportement des bétons à base de granulats recyclés*, Université Mentouri Constantine, 2010.
- [63] Mamery Serifou; *Béton à base de recyclât: influence du type de recyclât et rôle de la formulation*, Université de Bordeaux – Génie Civil (Géomatériaux), 2013.
- [64] [Wikipedia – Recyclage](#), consulté le 5 mai 2023.
- [66] (*duplication de [60]*) DIA Mouhamadou Bassirou & Soumah Mouloukou Souleymane; même texte et année (mémoire répété).
- [67] Karim Ouamane; *DG L'AND au service de la gestion des déchets industriels*, Alger, 25 mai 2017.
- [68] *La filière traitement des déchets: «Déchets, mode d'emploi»*, 2012.
- [69] Barkat Abderezak; *Valorisation des déchets de brique dans la réalisation des ouvrages en béton*, Thèse de Magister, Université Kasdi Merbah (Ouargla), 2006–2007.
- [70] *Lexique déchet*, 2004.
- [71] *Prescrivez le tri des déchets de chantier sur vos opérations*, disponible sur [www.cnidep.com](http://www.cnidep.com).
- [72] F. Habib; *Valorisation des granulats recyclés de déchets de carreaux faïence dans la formulation des bétons autoplaçants*, Mémoire de Master, Université M'Hamed Bougara (Boumerdès), 2016.
- [73] Franck Boelhy (QSE Région Nord-Est), Groupe SNEF; *Guide des déchets*.
- [74] El Hafiane Siham; *Gestion des déchets solides au niveau de la Commune urbaine d'Agadir et leur impact sur le milieu naturel*, Mémoire de fin d'études, 1 mars 2012.
- [75] *Journal officiel de la République algérienne n° 27 (4 Rabie el Aoul 1426 / 13 avril 2005)*.
- [76] <https://www.citya.com/immobilier/nos-guides/neuf/les-differents-types-de-briques>
- [77] <https://www.constructionlabrique.com/quel-type-brique-construire-mur/>
- [78] L. Alviset; *Matériaux de Terre Cuite*, Techniques de l'Ingénieur, 1994.
- [79] Akhtaruzzaman A.A., Hasnat; *Properties of Concrete Using Crushed Brick As Aggregate*, *Concrete International*, vol. 5, n° 2, fév. 1983, pp. 58–63.
- [80] R. Delbecque; *Éléments de Construction "Bâtiment"*, Édition Delagrave, 1990.
- [81] Adam M.N.; *Propriétés des bétons*, Édition Eyrolles, 2000.
- [82] Dreux G.; *Nouveau guide du béton*, 1979.
- [83] (*duplication de [61]*) Boufedah Badissi A.; même thèse, Université de Mentouri

(Constantine), 2011.

[84] *Béton – Définition* (Encyclopédie scientifique en ligne), Techno-Science.net, 2008.

# **ANNEXES**

## *ANNEXE 1*

## NOTICE PRODUIT

# Sika® Plastiment® BV-40

Plastifiant/Réducteur d'eau pour hautes résistances mécaniques

## INFORMATIONS SUR LE PRODUIT

Sika® Plastiment® BV-40 est un plastifiant réducteur d'eau énergétique qui :

- augmente la compacité du béton, entraînant ainsi une amélioration des résistances mécaniques et de l'imperméabilité
- facilite la mise en place du béton
- permet éventuellement de réduire le dosage en ciment
- permet d'obtenir un retard de début de prise plus ou moins important en augmentant le dosage normal d'utilisation de béton à performances élevées, aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci

## DOMAINES D'APPLICATION

### Augmentation des résistances mécaniques

Sika® Plastiment® BV-40 permet de réduire l'eau de gâchage d'environ 10 % sans diminuer la maniabilité du témoin. Des essais sont indispensables pour déterminer la quantité d'eau de gâchage nécessaire à l'obtention de la maniabilité souhaitée. La compacité et l'imperméabilité sont améliorées. Les résistances mécaniques à long terme sont augmentées en moyenne de 15 à 40 %.

Sika® Plastiment® BV-40 est donc particulièrement indiqué pour :

- les bétons armés à hautes performances
- les bétons précontraints
- les bétons préfabriqués étuvés

### Réduction du dosage en ciment

Sika® Plastiment® BV-40 permet de réduire le dosage en ciment de l'ordre de 10% en conservant les résistances mécaniques. Il est utilisé dans ce cas en B.P.E. pour la confection de béton à la résistance.

### Amélioration de la maniabilité

Sika® Plastiment® BV-40 permet d'améliorer la maniabilité à teneur en eau constante, tout en apportant une augmentation des résistances à long terme de 10% environ. Il est donc utilisé pour la confection de pièces élancées, fortement ferraillées et dans le cas de

bétons pompés.

### Augmentation du délai de mise en oeuvre

A dosage élevé, le Sika® Plastiment® BV-40 augmente le temps de prise du béton. La température jouant un rôle important, il est bon de procéder à des essais. A titre indicatif :

- à 20°C, on obtient un retard de prise de 3 à 4 heures environ avec 0,6 %
- à 5°C, le même dosage provoque un retard de prise de l'ordre de 8 h

Sika® Plastiment® BV-40 est compatible avec nos entraîneurs d'air Sika® Aer et Sika® Aer-5. Cette combinaison conduit à :

- l'amélioration des résistances aux cycles gel-dégel
- la possibilité de coulage en continu (béton extrudé, béton routier)
- l'amélioration des résistances de tous bétons situés dans les zones de marnage

## CARACTÉRISTIQUES / AVANTAGES

Sika® Plastiment® BV-40, grâce à ses propriétés physico-chimiques permet :

### Sur béton frais :

- d'augmenter considérablement la maniabilité même en réduisant l'eau de gâchage
- de disperser le ciment dans la masse
- d'améliorer l'adhérence béton-armatures
- de s'opposer à la ségrégation
- d'améliorer la thixotropie
- d'étaler éventuellement la prise

### Sur béton durci :

- d'augmenter les résistances mécaniques,
- d'accroître la compacité
- d'augmenter l'imperméabilité
- de diminuer le retrait et le fluage

Sika® Plastiment® BV-40 est compatible avec tous les ciments et en particulier le ciment fondu.

## AGRÈMENTS / NORMES

- Caractéristiques sur béton frais, résistances méca-

### Notice produit

Sika® Plastiment® BV-40  
 Juillet 2023, Version 01.03  
 02130201100000717

- niques à 7 et 28 jours, perméabilité, capillarité : CE-MEREX - PV n° 363. 1.014 du 11.02.72.
- Résistances mécaniques à 7, 28, 90 et 365 jours : EM-PA ZURICH - PV n° 59239/32 du 10.02.69
- Conformité à la norme ASTM C 494 type A : TESWELL Laboratoires (USA) - PV n° IZ-15 du 23.08.79

## DESCRIPTION DU PRODUIT

<b>Base chimique</b>	Solution aqueuse de lignosulfonates modifiés
<b>Conditionnement</b>	Fût de 250 kg Cubi de 1100 kg
<b>Durée de Conservation</b>	Dans son emballage d'origine intact, le produit se conserve 3 ans
<b>Conditions de Stockage</b>	Sika® Plastiment® BV-40 gèle à - 5°C environ. En cas de gel prolongé et intense, vérifier s'il n'a pas été déstabilisé.
<b>Aspect / Couleur</b>	Brun foncé
<b>Densité</b>	1,180 ± 0,025
<b>Extrait Sec</b>	36,6 à 40,4 %
<b>Valeur pH</b>	4,5 ± 1
<b>Teneur Totale en Ions Chlorure</b>	< 0,1 %
<b>Équivalent Oxyde de Sodium</b>	≤ 2,0 %

## INFORMATIONS TECHNIQUES

<b>Instructions pour le Bétonnage</b>	Introduire le Sika® Plastiment® BV-40 dans l'eau de gâchage.
---------------------------------------	--

## RENSEIGNEMENTS SUR L'APPLICATION

<b>Dosage</b>	Le dosage précis du Sika® Plastiment® BV-40 est fonction des conditions de chantier et de l'effet recherché. Plage d'utilisation recommandée : 0,3 à 1% du poids du ciment (soit 0,25 à 0,85 litre pour 100 kg de ciment). Comme retardateur: A partir de 0,5% du poids du ciment (soit 0,42 litre pour 100 kg de ciment). Son dosage exact se détermine sur chantier en procédant à quelques essais puisqu'il est fonction de la nature des composants du béton, des qualités recherchées (compacité, plasticité) et des conditions climatiques.  Ne pas dépasser 1% (0,85 litre pour 100 kg de ciment) sans essai préalable : possibilité de retard de prise important.
<b>Distribution</b>	Introduire le Sika® Plastiment® BV-40 dans l'eau de gâchage.

## VALEURS DE BASE

Toutes les valeurs indiquées dans cette Notice Produit sont basées sur des essais effectués en laboratoire. Les valeurs effectives mesurées peuvent varier du fait de circonstances indépendantes de notre contrôle.

## ÉCOLOGIE, SANTÉ ET SÉCURITÉ

Pour obtenir des informations et des conseils sur la manipulation, le stockage et l'élimination en toute sécurité des produits chimiques, les utilisateurs doivent consulter la fiche de données de sécurité (FDS) la plus

récente contenant les données physiques, écologiques, toxicologiques et autres données relatives à la sécurité.

## RESTRICTIONS LOCALES

Veillez noter que du fait de réglementations locales spécifiques, les données déclarées pour ce produit peuvent varier d'un pays à l'autre. Veuillez consulter la Notice Produit locale pour les données exactes sur le produit.

## INFORMATIONS LÉGALES

Notice produit  
Sika® Plastiment® BV-40  
Juillet 2023, Version 01.03  
02130201100000717

2 / 3

BUILDING TRUST



Les informations, et en particulier les recommandations concernant les modalités d'application et d'utilisation finale des produits Sika sont fournies en toute bonne foi et se fondent sur la connaissance et l'expérience que Sika a acquises à ce jour de ses produits lorsqu'ils ont été convenablement stockés, manipulés et appliqués dans des conditions normales, conformément aux recommandations de Sika. En pratique, les différences entre matériaux, substrats et conditions spécifiques sur site sont telles que ces informations ou recommandations écrites, ou autre conseil donné, n'impliquent aucune garantie de qualité marchande autre que la garantie légale contre les vices cachés, ni aucune garantie de conformité à un usage particulier, ni aucune responsabilité découlant de quelque relation juridique que ce soit. L'utilisateur du produit doit vérifier par un essai sur site l'adaptation du produit à l'application et à l'objectif envisagés. Sika se réserve le droit de modifier les propriétés de ses produits. Notre responsabilité ne saurait d'aucune manière être engagée dans l'hypothèse d'une application non conforme à nos renseignements. Les droits de propriété détenus par des tiers doivent impérativement être respectés. Toutes les commandes sont soumises à nos conditions générales de vente et de livraison en vigueur. Les utilisateurs doivent impérativement consulter la version la plus récente de la Notice Produit correspondant au produit concerné, accessible sur internet ou qui leur sera remise sur demande.

**Sika El Djazair SPA**  
08 route de Larbaa  
16111 Les Eucalyptus  
ALGERIE  
Tél.: 0 23 88 89 92 09  
Fax: 0 23 88 89 92 08  
dza.sika.com



**Notice produit**  
Sika® Plastiment® BV-40  
Juillet 2023, Version 01.03  
02130201100000717

**3 / 3**

SikaPlastimentBV-40-fr-DZ-(07-2023)-1-3.pdf

**BUILDING TRUST**



## ***ANNEXE 2***



50kg

# ماتين MATINE

ALGÉRIE

**LAFARGE**  
Construire  
des villes meilleures™



## Ciment portland au Calcaire

NA442 CEM II/B-L 42,5 N

**Matine** Ciment gris pour bétons de haute-performance destiné à la construction des Ouvrages d'Art, infrastructure et superstructure pour bâtiments

**Matine**  
NA442 CEM II/B-L 42,5 N

**Matine** est certifié, conforme à la norme Algérienne (NA442 – 2013) et Européenne (EN 197-1)

### AVANTAGES PRODUIT



- Une résistance initiale élevée pour vos ouvrages nécessitant un décoffrage rapide
- Favorise la maniabilité du béton et le maintien de sa rhéologie
- Une Classe Vraie qui offre une haute performance au béton.
- Meilleure durabilité du béton.






MEMBRE DE  
**HOLCIM**

## APPLICATIONS RECOMMANDÉES

- Construction des Ouvrages d'Art, infrastructure et superstructure pour bâtiments
- Préfabrication légère
- Béton de haute performance



## FORMULATION CONSEILLÉE

	Ciment 	Sable (sec) 	Gravillons (sec)		Eau (litres) 
		0/5	8/15mm	15/25mm	
<b>Dosage pour béton c25/30</b>	X 1 	+ X7 	+ X5 	+ X4 	+ 25 L

Remarque: un bidon = 10 Litres

## CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

### • Analyses chimiques

	Valeur
Perte au feu (%) (NA5042)	10.0±2
Teneur en sulfates (SO3) (%)	2.5±0.5
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%)	Max 5%
Teneur en Chlorures(NA5042) (%)	< 0,1

### • Composition minéralogique du Clinker (Bogue)

	Valeur
C3S (%)	60±3
C3A (%)	8±2

### • Propriétés physiques

	Valeur
Consistance Normale (%)	26.5±2.0
Finesse suivant la méthode de Blaine (cm <sup>2</sup> /g) (NA231)	3 700 - 5 200
Retrait à 28 jours (µm/m)	< 1 000
Expansion (mm)	≤ 3.0

### • Temps de prise à 20° (NA 230)

	Valeur
Début de prise (min)	150±30
Fin de prise (min)	230±50

### • Résistance à la compression

	Valeur
2 jours (MPa)	≥ 10.0
28 jours (MPa)	≥ 42.5

## CONSIGNES DE SÉCURITÉ

1- **PROTÉGEZ VOTRE PEAU** : Portez les équipements adaptés dans vos chantiers: casques, lunettes, gants, genouillères, chaussures et vêtements de sécurité.

2- **MANUTENTION** : levez le sac en pliant les genoux et en gardant le dos droit.



MEMBRE DE  
**HOLCIM**

Conditionnement:  / 

### LAFARGE ALGÉRIE

Bureau n°02, 16ème étage, tour Geneva,  
les Pins maritimes, Mohammadia, Alger.  
tél: + 213 (0) 21 98 54 54  
Fax: + 213 (0) 23 92 42 94  
www.lafargealgerie.com  
dz.satisfaction-clients@lafargeholcim.com  
Tél: 021 98 55 55

**LAFARGE**  
لافارج